



Tesis - TF142510

**ANALISIS PERILAKU DIFUSI DAN RAPAT ARUS
SEL SURYA *MULTIJUNCTION* SEMIKONDUKTOR
GOLONGAN III-V TERHADAP KETEBALAN
SUSUNAN SEL**

Ayu Kusuma Wardhani

NRP. 2414201008

Dosen Pembimbing :

Dr.rer.nat. Ir. Aulia Nasution M,Sc.

NIP: 19671117 199702 1 001

Gunawan Nugroho ST. MT. PhD

NIP: 19771127 200212 1 002

PROGRAM STUDI MAGISTER

JURUSAN TEKNIK FISIKA

FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI

INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER

SURABAYA

2016



Thesis - TF142510

ANALYSIS OF DIFFUSION AND CURRENT DENSITY BEHAVIOR IN MULTIJUNCTION SEMICONDUCTOR III-V SOLAR CELLS TO CELL'S THICKNESS

AYU KUSUMA WARDHANI
NRP. 2414201008

SUPERVISOR
Dr.rer.nat. Ir. Aulia MTN. M,Sc.
NIP: 19671117 199702 1 001
Gunawan Nugroho ST. MT. PhD
NIP: 19771127 200212 1 002

MASTER PROGRAM
DEPARTMENT OF ENGINEERING PHYSICS
INDUSTRY INSTRUMENTATION ENGINEERING
FACULTY OF INDUSTRIAL TECHNOLOGY
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2016

Tesis disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar
Magister Teknik (M.T.)
di
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

oleh :
AYU KUSUMA WARDHANI
NRP. 2414 201 008

Tanggal Ujian : 20 Juli 2016
Periode Wisuda : September 2016

Disetujui oleh :

1. Dr.rer.nat.Ir.Aulia Nasution M.Sc.
NIP. 19671117 199702 1 001

..... (Pembimbing I)

2. Gunawan Nugroho ST.MT.PhD
NIP. 19771127 200212 1 002

..... (Pembimbing II)

3. Dr.-Ing. Doty Dewi Risanti, S.T., M.T.
NIP. 19740903 199802 2 001

..... (Penguji I)

4. Dr.Ridho Hantoro ,ST,MT,
NIP. 19761223 200501 1 001

..... (Penguji II)



an. **Direktur Program Pascasarjana**
Asisten Direktur

Prof. Dr. Ir. Tri Widjaja, M.Eng.
NIP. 19611021 198603 1 0

Direktur Program Pascasarjana,

Prof. Ir. Djauhar Manfaat, M.Sc., Ph.D.
NIP. 19601202 198701 1 001

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

Analisis Perilaku Difusi dan Rapat Arus Sel Surya *Multijunction* Semikonduktor Golongan III-V Terhadap Ketebalan Susunan Sel

Nama Mahasiswa : Ayu Kusuma Wardhani

NRP : 2414201008

Pembimbing : Dr.rer.nat. Ir. Aulia Nasution M,Sc.
Gunawan Nugroho ST. MT. PhD

ABSTRAK

Sel surya adalah suatu piranti yang dapat menyerap radiasi matahari dan mengubahnya menjadi energi listrik. Di dalam penelitian ini, bahan semikonduktor yang digunakan adalah *compound crystal* III-V dengan metode *multijunction* P-N. Konfigurasi yang diterapkan terdiri dari 3 macam lapisan, yaitu *double junction* (AlAs-InGaP), *triple junction* (AlAs-InGaP-GaSb) dan *multi junction* (AlAs-InGaP-GaSb-InAs). Pada penelitian ini, parameter yang dibuat bervariasi adalah *bandgap* sel surya dan ketebalan dari sel tersebut. Berdasarkan konfigurasi tersebut diatas, dilakukan perhitungan analitis untuk mengetahui nilai rapat arus yang mempengaruhi besar efisiensi sel surya. Hasil perhitungan tersebut dibandingkan dengan perhitungan berdasarkan teori. Dari penelitian ini diketahui tebal sel surya dapat diprediksi dengan perhitungan analitis dengan tebal maksimum diperoleh dari lebar deplesi dan jarak difusi pembawa muatan minoritas sedangkan tebal minimum menggunakan medan listrik. Seharusnya dalam perhitungan digunakan pendekatan melalui nilai absorbansi. Semakin tinggi doping maka tebal semakin turun. Nilai V_{OC} dan I_{SC} juga dipengaruhi oleh doping, semakin tinggi doping nilai I_{SC} akan turun dan nilai V_{OC} akan naik. Nilai efisiensi maksimal didapatkan dari sel surya *multijunction compound crystal* AlAs-InGaP-GaSb-InAs. Hal tersebut dikarenakan, semakin lebar rentang panjang gelombang cahaya matahari yang diserap maka makin besar efisiensi yang dihasilkan. Selain itu, dari pengaruh ketebalan didapatkan kesimpulan bahwa efisiensi tertinggi didapatkan dari ketebalan sel 40 μ m.

Keyword : perilaku difusi dan rapat arus pada ketebalan sel, sel surya *mutijunction*, semikonduktor *compound crystal* III-V

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

Analysis of Diffusion and Current Density Behavior in Multijunction Semiconductor III-V Solar Cells to Cell's Thickness

Student's Name : Ayu Kusuma Wardhani
NRP : 2414201008
Department : Engineering Physics, FTI - ITS
Supervisor : Dr.rer.nat. Ir. Aulia Nasution M,Sc.
Gunawan Nugroho ST. MT. PhD

ABSTRACT

Solar cell is a device that can absorb solar radiation and convert it into electricity. In this study, the materials used are multi junction semiconductors III-V compound crystal heterojunction. The constant variable in this solar cells design are length and width of each layer in P-N cells, while the variety of this design is material's bandgap. There are 3 configurations of solar cells that produced in this project: double junction solar cells (AlAs-InGaP), triple junction solar cells (AlAs-InGaP-GaSb) and multi junction solar cells (AlAs-InGaP-GaSb-InAs). In this research, the variation parameters are solar cell's bandgap and it thickness. Based on the above configuration, performed analytical calculations to determine the value of the current density which affects the efficiency of solar cells. The results of these calculations compared to calculations based on theory. From this research note thick solar cells can be predicted by analytical calculations obtained with maximum thickness of the width of depletion and diffusion distance of minority carriers whereas the minimum thickness using an electric field. Supposed to be used in the calculation of the approach through absorbance values. The higher the doping, the thicker the more down. V_{OC} and I_{SC} value is also influenced by doping, doping the higher the I_{SC} values going down and V_{OC} going up. Values obtained from the maximum efficiency multijunction solar cells compound crystal pedestal-InGaP-GaSb-InAs. That is because, the wider the range of wavelengths of sunlight that is absorbed, the greater the efficiencies generated. In addition, the influence of the thickness of it was concluded that the highest efficiency is obtained from a cell thickness of 40 μ m.

Keywords: compound crystal semiconductor III-V, diffusion and current density
behavior to cell thickness, multijunction solar cells

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur kehadiran Allah SWT atas rahmat, hidayah, dan pertolongan-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan tesis yang berjudul **Analisis Perilaku Difusi dan Rapat Arus Sel Surya *Multijunction* Semikonduktor Golongan III-V Terhadap Ketebalan Susunan Sel**. Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada pihak yang telah membantu dalam penyelesaian laporan ini, diantaranya:

1. Bapak Dr.rer.nat. Ir. Aulia Nasution M,Sc dan Gunawan Nugroho ST. MT. PhD selaku dosen pembimbing atas kesabaran dan kebaikan dalam membimbing serta memberikan saran dan bantuan dalam pengerjaan tesis.
2. Ibu Dr. –Ing. Doty D. Risanti, M.T., dan ibu Prof.Dr.Ir.Aulia S.A. MT, selaku tim penguji atas saran dan kritik yang membangun selama pengerjaan tesis ini. Serta bapak Dr.Bambang L.W. ST,MT selaku dosen wali penulis.
3. Kepada Direktorat Jendral Perguruan Tinggi (Dikti) atas bantuan materi berupa beasiswa yang telah diberikan kepada penulis sehingga penulis mampu menempuh pendidikan jenjang Magister di ITS.
4. Para dosen pengajar Program Studi S2 Jurusan Teknik Fisika. Terima kasih atas ilmu yang telah diberikan. Mbak Martha, terima kasih atas bantuannya.
5. Suami, orang tua dan seluruh keluarga yang senantiasa memberikan dukungan material, spiritual dan moral kepada penulis.
6. Teman–teman program studi S2 Rekayasa Instrumentasi Industri atas kebersamaannya dan segala macam bantuan yang diberikan tanpa pamrih.
7. Segenap pihak yang berkontribusi dalam penyelesaian tesis ini yang tidak dapat penulis sebutkan satu per satu.

Penulis menyadari pada laporan ini masih terdapat kekurangan, baik teori maupun teknis. Karena itu kritik dan saran yang membangun sangat penulis harapkan demi laporan yang lebih baik. Penulis berharap tesis ini bermanfaat bagi semua pihak dan menambah wawasan bagi pembaca.

Surabaya, Agustus 2016

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
LEMBAR PENGESAHAN.....	iii
ABSTRAK	v
ABSTRACT	vii
DAFTAR ISI	x
DAFTAR GAMBAR.....	xii
DAFTAR TABEL	xiv
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Tujuan Penelitian.....	2
1.4 Lingkup Penelitian	2
1.5 Manfaat Penelitian.....	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Sel Surya	5
2.2 Sel Surya <i>Multijunction</i>	6
2.3 Efisiensi Sel Surya	11
2.3.1 Medan Listrik	12
2.3.2 Konsentrasi hole dan elektron	13
2.4 Melakukan Perhitungan Sel Surya	13
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	15
3.1 Menentukan Variabel Sel Surya.....	15
3.2 Melakukan Desain Sel Surya	16
3.3 Melakukan Perhitungan dan Analisis Sel Surya	17

BAB IV HASIL DAN PEMBAHSAN	19
4.1 Karakteristik Diagram Pita Energi pada Sel Surya <i>Multijunction</i>	19
4.2 Analisis Optis dan Ketidaksesuaian Kristal Semikonduktor Yang Digunakan Dalam Rancangan Sel Surya.....	25
4.3 Analisis Transfer Elektron di Dalam Sel Berdasarkan Diagram Pita Energi	27
4.4 Perbandingan Medan Listrik	31
4.5 Perbandingan Densitas Pembawa Muatan.....	35
4.6 Perbandingan Rapat Arus Keluaran Sambungan <i>Homojunction</i>	38
4.7 Perbandingan Efisiensi Sel Surya.....	44
4.8 Perbandingan Tebal Lapisan Semikonduktor.....	46
BAB V KESIMPULAN.....	53
5.1 Kesimpulan.....	53
5.2 Saran	53
DAFTAR PUSTAKA	
LAMPIRAN.....	
A. Rapat arus sel surya <i>multijunction</i>	
B. Penyederhanaan Persamaan Maxwell	
C. Penyederhanaan Persamaan Difusi.....	
D. Perhitungan Distribusi Pembawa Muatan	
E. Perhitungan Tebal Lapisan Sambungan n-p.....	
F. Rapat Arus Keluaran	
BIOGRAFI.....	

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Spektrum yang dapat diserap oleh <i>absorber</i> dari radiasi matahari dengan masing- masing panjang gelombang (Andreev, 2012).....	5
Gambar 2.2	Efisiensi maksimum sel surya berdasarkan SQ Limits (Philipps, Dimroth, & Bett, 2012).....	6
Gambar 2.3	Elektron-hole dalam keadaan generasi-rekombinasi (Philipps et al., 2012)	7
Gambar 2.4	Keadaan elektron dan hole saat terdapat energi fermi (Philipps et al., 2012)	7
Gambar 2.5	Energi fermi yang terdapat di pita valensi dan konduksi (Philipps et al., 2012)	8
Gambar 2.6	<i>Range</i> spektrum yang diserap masing-masing lapisan sel (Kurtz, Olson, Geisz, Wanlass, & McMahon, 2006).....	11
Gambar 4.1	Diagram pita energi rancangan sel surya untuk konsentrasi akseptor dan donor 10^{15} cm^{-3}	22
Gambar 4.2	Diagram pita energi rancangan sel surya untuk konsentrasi akseptor dan donor 10^{17} cm^{-3}	23
Gambar 4.3	Diagram pita energi rancangan sel surya untuk konsentrasi akseptor dan donor 10^{19} cm^{-3}	24
Gambar 4.4	Estimasi V_{OC} dan pengaruh konsentrasi donor dan akseptor pada sambungan <i>homojunction</i> rancangan sel surya.....	25
Gambar 4.5	Iradiasi cahaya matahari pada AM 0 dan AM 1.5 dan panjang gelombang <i>cut-off</i> dari semikonduktor yang digunakan.....	26
Gambar 4.6	Medan listrik terhadap lebar deplesi sel surya	32
Gambar 4.7	Distribusi medan listrik pada sambungan p-n <i>homojunction</i> . Daerah di bawah kurva merupakan V_{bi}	33
Gambar 4.8	Perbandingan medan listrik maksimum yang dihasilkan oleh sambungan p-n <i>homojunction</i> melalui persamaan (4.18) dan (4.23)..	34
Gambar 4.9	Medan listrik terhadap lebar deplesi sel surya sambungan <i>heterojunction</i>	35
Gambar 4.10	Konsentrasi pembawa muatan terhadap lebar deplesi sel surya	36

Gambar 4.11 Konsentrasi pembawa muatan terhadap deplesi sambungan <i>heterojunction</i>	38
Gambar 4.12 Skema rangkaian sel surya <i>multijunction</i>	38
Gambar 4.13 Rapat arus sel surya dengan N_A dan $N_D = 10^{19}/\text{cm}^3$	40
Gambar 4.14 Rapat arus sel surya dengan N_A dan $N_D = 10^{15}/\text{cm}^3$	41
Gambar 4.15 Rapat arus sel surya dengan N_A dan $N_D = 10^{15}/\text{cm}^3$	41
Gambar 4.16 Grafik hubungan tegangan dengan rapat arus yang dihasilkan oleh sambungan n-p homojunction pada konsentrasi doping 10^{15} cm^{-3} melalui persamaan (4.32).	43
Gambar 4.17 Grafik hubungan tegangan dengan rapat arus yang dihasilkan oleh sambungan n-p homojunction pada konsentrasi doping 10^{17} cm^{-3} melalui persamaan (4.32).	43
Gambar 4.18 Grafik hubungan tegangan dengan rapat arus yang dihasilkan oleh sambungan n-p homojunction pada konsentrasi doping 10^{19} cm^{-3} melalui persamaan (4.32).	44
Gambar 4. 19 Grafik hubungan tebal sambungan n-p pada setiap material dengan konsentrasi doping (a) 10^{15} cm^{-3} (b) 10^{17} cm^{-3} (c) 10^{19} cm^{-3}	49
Gambar 4.20 Grafik hubungan tebal sambungan total pada setiap material dengan konsentrasi doping (a) 10^{15} cm^{-3} (b) 10^{17} cm^{-3} (c) 10^{19} cm^{-3}	50

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1	Daftar energi <i>bandgap</i> pada beberapa bahan semikonduktor.....	10
Tabel 3.1	Parameter <i>bandgap</i> , mobilitas elektron dan hole (Schubert, 2015).....	15
Tabel 3.2	<i>Life-time</i> dan konstanta difusi muatan elektron dan muatan hole (Kroemer, 2004)	16
Tabel 3.3	Konsentrasi elektron pada pita valensi dan konduksi (Adachi, 2005).....	16
Tabel 3.4	Afinitas elektron, fungsi kerja dan permitivitas semikonduktor.	16
Tabel 4.1	Hasil perhitungan pembawa muatan intrinsik	20
Tabel 4.2	Parameter yang digunakan dalam diagram pita energi.....	21
Tabel 4.3	Panjang gelombang <i>cut-off</i> dari semikonduktor yang digunakan.....	26
Tabel 4.4	Karakteristik bandgap dan parameter kisi kristal semikonduktor	26
Tabel 4.5	Densitas elektron teremisi termionik untuk rancangan sel surya.	28
Tabel 4.6	Massa efektif elektron dari semikonduktor paduan III-V yang digunakan dalam rancangan sel surya dengan $m_0 = 9,11 \times 10^{-31} \text{ kg}$, adalah massa diam elektron	29
Tabel 4.7	Probabilitas penerobosan pada sambungan heterojunction dari rancangan sel surya.	29
Tabel 4.8	Probabilitas penerobosan pada sambungan homojunction dari rancangan sel surya.	30
Tabel 4.9	Efisiensi sel surya <i>double</i> , <i>triple</i> dan <i>multi junction</i> pada konsentrasi $10^{19}/\text{cm}^3$	45
Tabel 4.10	Efisiensi sel surya <i>double</i> , <i>triple</i> dan <i>multi junction</i> pada konsentrasi $10^{17}/\text{cm}^3$	45
Tabel 4.11	Efisiensi sel surya <i>double</i> , <i>triple</i> dan <i>multi junction</i> pada konsentrasi $10^{15}/\text{cm}^3$	46
Tabel 4.12	Ketebalan sel surya <i>double junction</i> , <i>triple junction</i> dan <i>multi junction</i> untuk konsentrasi donor dan akseptor $10^{15}/\text{cm}^3$	46
Tabel 4.13	Ketebalan sel surya <i>double junction</i> , <i>triple junction</i> dan <i>multi junction</i> untuk konsentrasi donor dan akseptor $10^{17}/\text{cm}^3$	47
Tabel 4.14	Ketebalan sel surya <i>double junction</i> , <i>triple junction</i> dan <i>multi junction</i> untuk konsentrasi donor dan akseptor $10^{19}/\text{cm}^3$	47

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Solar cells atau sel surya merupakan salah satu teknologi yang memanfaatkan cahaya matahari untuk dikonversikan ke energi listrik (Fthenakis, 2012). Sel surya dapat dibuat dari bahan anorganik (semikonduktor) dan bahan organik (*Dye Sensitized Solar Cells*). Bahan sel surya yang kini berkembang adalah sel surya yang mengkonversikan energi matahari dengan bahan semikonduktor dengan prinsip fotovoltaiik. Efek *photovoltaic* merupakan fenomena munculnya arus dan tegangan listrik akibat adanya kontak dua lapisan bahan semikonduktor yang dihubungkan di bawah paparan cahaya matahari. Bahan semikonduktor terdiri dari beragam jenis, salah satunya adalah *compound crystal*.

Permasalahan yang terus dihadapi dalam penelitian mengenai sel surya sejak pertama kali ditemukan oleh Shockley dan Queisser pada tahun 1960 adalah bagaimana mendesain sel surya yang dapat menghasilkan nilai efisiensi yang maksimum (Landsberg & Markvart, 2012). Misalkan satu lapangan sepak bola yang tertutup oleh sel surya dapat menghasilkan daya sebesar 500 kW, sementara suatu negara memerlukan daya hingga 3 TW. Itu artinya dibutuhkan enam juta kali luas lapangan sepak bola. Hal tersebut tentu tidak efektif, mengingat jika luas permukaan yang dibutuhkan untuk membuat sel surya makin besar, itu berarti akan memerlukan lahan yang luas. Maka dari itu, digunakan metode lain yang dapat digunakan untuk meningkatkan konversi efisiensi sel surya tersebut, yaitu dengan membuat struktur banyak lapisan yang terdiri dari beberapa lapisan tipe- p dan tipe- n yang memungkinkan sel surya untuk menyerap radiasi sinar matahari dengan rentang spektrum panjang gelombang yang lebar. Metode tersebut dinamakan dengan *multijunction solar cells* atau dapat disebut juga sebagai sel surya tandem yang dapat meningkatkan konsentrasi dari energi matahari tanpa harus memperbesar luas permukaannya (Yang & Pan, 2015).

Memodelkan sel surya tentu sangatlah penting sebelum dilakukan fabrikasi untuk mengetahui nilai efisiensi sel surya yang dihasilkan pada desain tersebut baik terhadap dimensinya ataupun dengan panjang gelombang bahan penyusunnya. Salah

satu cara untuk memodelkan sel surya adalah menggunakan metode analitis dengan cara menghubungkan parameter fisis yang dimiliki sel surya ke dalam suatu persamaan Maxwell dan persamaan difusi (Yang & Altermatt, 2008). Dengan mendapatkan nilai keluaran berupa penjalaran gelombang listrik di dalam medium serta dengan menghitung konsentrasi pembawa muatan yang terkandung dalam sel surya, akan didapatkan nilai arus yang dapat digunakan untuk mengukur besar efisiensi suatu sel surya (Sukhoivanov, 2009).

Dalam penelitian ini, akan dilakukan analisa terhadap perilaku pembawa muatan dan rapat arus sel surya *multijunction* semikonduktor golongan III-V terhadap ketebalan susunan sel. Melalui penelitian ini, diharapkan akan dapat dihasilkan sel surya tandem golongan III-V berbahan semikonduktor dengan nilai konversi efisiensi yang maksimal.

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah yang digunakan dalam penelitian berdasarkan dengan latar belakang di atas adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana melakukan perhitungan analitis terhadap efisiensi sel surya dengan variasi konsentrasi donor dan akseptor dan *bandgap* bahan penyusunnya.
2. Bagaimana perilaku difusi dan rapat arus sel surya *multijunction* semikonduktor golongan III-V terhadap ketebalan susunan sel.

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah melakukan perhitungan analitis terkait dengan pencapaian efisiensi sel surya berbahan semikonduktor golongan III-V dengan variasi *bandgap* dan ketebalan. Kemudian setelah itu, dilakukan analisis perilaku difusi dan rapat arus sel surya *multijunction* semikonduktor golongan III-V terhadap ketebalan susunan sel.

1.4 Lingkup Penelitian

Seperti disebutkan sebelumnya, semikonduktor gabungan dari golongan III-V dipilih sebagai bahan dalam mendesain sel surya ini. Data keluaran yang didapat akan digunakan dalam penelitian ini untuk menghitung arus keluaran yang dihasilkan

oleh sel surya. Perlu diketahui bahwa terdapat beberapa batasan yang diberlakukan pada penelitian ini. Beberapa hal di antaranya adalah:

1. Bahan yang digunakan dalam desain sel surya ini adalah semikonduktor III-V *compound crystal* dengan *multijunction* P-N.
2. Konfigurasi sel surya yang digunakan adalah konfigurasi 2D

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini adalah untuk mengembangkan ilmu dalam bidang material fotonik serta dapat meningkatkan efisiensi konversi pada sel surya dengan mengubah parameter perilaku interaksi foton dari cahaya matahari terhadap material semikonduktor yang dibuat bervariasi pada golongan III-V.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

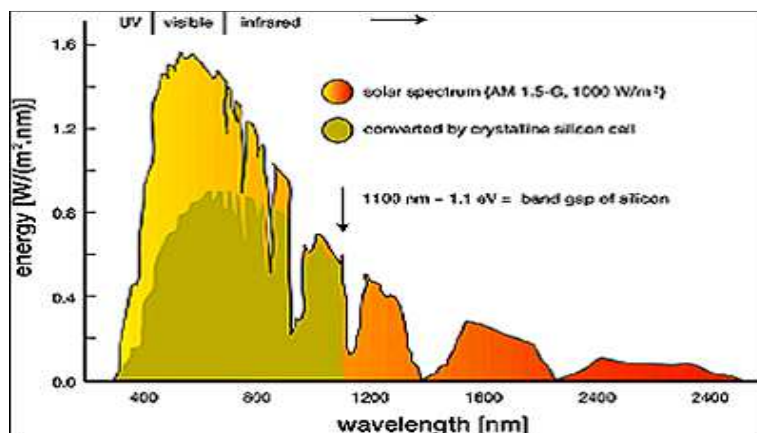
BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Sel Surya

Sel surya pertama kali diamati oleh Edmond Becquerel pada tahun 1839. Sel surya merupakan suatu alat atau devais yang mampu menangkap radiasi sinar matahari dan mengubahnya menjadi energi listrik dengan menggunakan prinsip fotovoltaiik, yaitu peristiwa terciptanya muatan listrik di dalam bahan sebagai akibat penyerapan cahaya dari bahan tersebut. Dalam proses photovoltaiik, jika elektron dalam beberapa bahan menyerap energi dari satu foton dan dengan demikian memiliki lebih banyak energi daripada fungsi kerja (energi ikat elektron) dari materi, itu dikeluarkan. Jika energi foton terlalu rendah, elektron tidak bisa keluar dari materi. Peningkatan intensitas sinar meningkatkan jumlah foton dalam berkas cahaya, dan dengan demikian meningkatkan jumlah elektron, tetapi tidak meningkatkan energi setiap elektron yang dimiliki. Energi dari elektron yang dipancarkan tidak tergantung pada intensitas cahaya yang masuk, tetapi hanya pada energi atau frekuensi foton individual. Ini adalah interaksi antara foton dan elektron terluar (Markvart & Castañer, 2012).

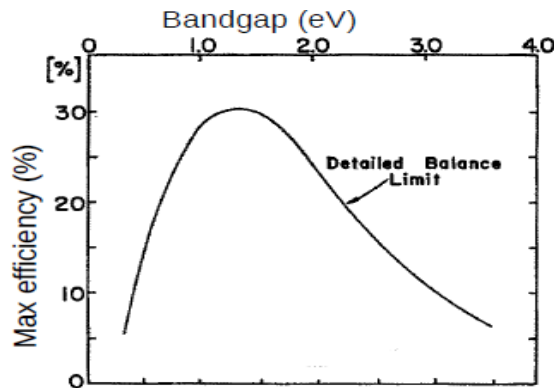
Parameter penting yang berhubungan dengan sel surya adalah intensitas radiasinya, yaitu jumlah daya matahari yang masuk ke permukaan sel surya per satuan luas (Andreev, 2012). Radiasi yang dipancarkan oleh matahari pada temperatur 6000 K, memberikan distribusi spektrum seperti yang ditunjukkan oleh gambar 2.1.



Gambar 2.1 Spektrum yang dapat diserap oleh *absorber* dari radiasi matahari dengan masing- masing panjang gelombang (Andreev, 2012)

2.2 Sel Surya *Multijunction*

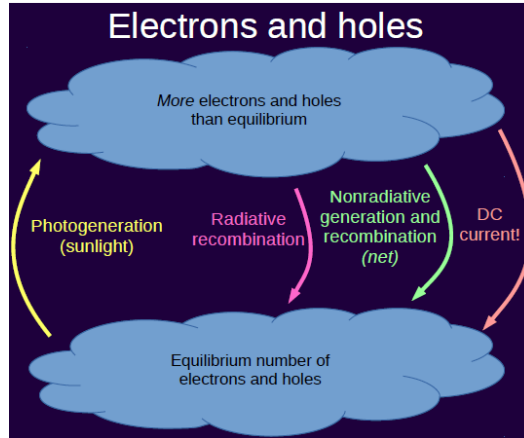
Pada tahun 1960, William Shockley dan Hans J. Quisser menemukan bahwa terdapat batas efisiensi dari sel surya yang dihasilkan yang kemudian dikenal sebagai teori SQ Limits seperti yang ditunjukkan oleh gambar 2.2 (Philipps, Dimroth, & Bett, 2012).



Gambar 2.2 Efisiensi maksimum sel surya berdasarkan SQ Limits (Philipps, Dimroth, & Bett, 2012)

Teori SQ limit menjelaskan mengenai efisiensi maksimal yang dapat dicapai oleh sel surya dengan menggunakan *single p-n junction*. Dari teori tersebut, kemudian dikembangkan berbagai produksi sel surya untuk mematahkan teori SQ limit tersebut.

Di dalam sel surya terdapat peristiwa foto-generasi dan rekombinasi radiatif serta generasi non-radiatif dan rekombinasi non-generatif. Foto-generasi merupakan peristiwa saat cahaya matahari datang mengenai permukaan sel surya dan menciptakan elektron-hole. Sementara rekombinasi radiatif terjadi saat cahaya dipantulkan kembali dari sel surya. Generasi non-radiatif terjadi saat elektron bereksitasi dari lapisan valensi menuju lapisan konduksi sementara pada peristiwa rekombinasi non-radiatif, yang terjadi adalah sebaliknya. Pada peristiwa foto-generasi, lebih banyak jumlah konsentrasi elektron dan hole yang terdapat di sel surya daripada keadaan equilibrium.



Gambar 2.3 Elektron-hole dalam keadaan generasi-rekombinasi (Philipps et al., 2012)

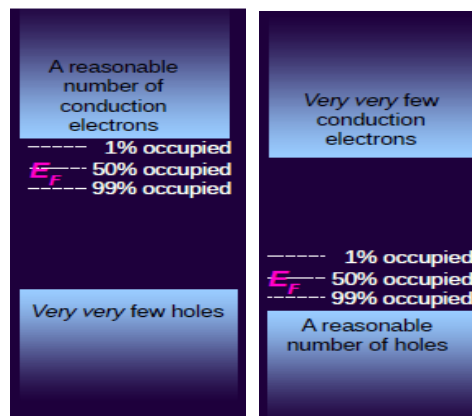
Dari gambar 2.3, diketahui bahwa rekombinasi radiatif tidak dapat dihilangkan karena rekombinasi radiatif merupakan reaksi dari foto-generasi. Rekombinasi radiatif memiliki persamaan (Philipps et al., 2012)

$$RR = e^{\frac{qV}{k_B T}} \frac{2\pi}{c^2 h^3} \int_{E_{gap}}^{\infty} \frac{E^2 dE}{e^{\left(\frac{E}{k_B T_{sel}}\right)} - 1} \quad (2.1)$$

Dari persamaan (2.1), rekombinasi radiatif semakin besar seiring dengan meningkatnya tegangan ($e^{\frac{qV}{k_B T}}$). Hal tersebut dipengaruhi oleh tingkat Quasi-Fermi yang diawali oleh distribusi Fermi-Dirac. Distribusi Fermi-Dirac muncul pada keadaan equilibrium termodinamik dengan persamaan

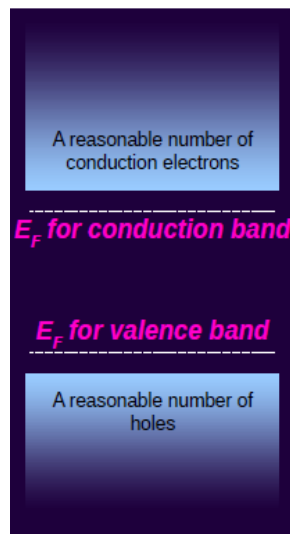
$$P(E) = \frac{1}{1 + e^{\frac{E - E_f}{k_B T}}} \quad (2.2)$$

Dimana E_f disebut dengan energi Fermi. Penerapan fungsi distribusi Fermi-Dirac pada semikonduktor terdapat pada pengisian pita energi seperti gambar 2.4.



Gambar 2.4 Keadaan elektron dan hole saat terdapat energi fermi (Philipps et al., 2012)

Pada gambar pertama, dimana $E_f > E$ disebut sebagai semikonduktor tipe-n. Sementara pada gambar kedua, dimana $E_f < E$ disebut sebagai semikonduktor tipe-p.



Gambar 2.5 Energi fermi yang terdapat di pita valensi dan konduksi (Philipps et al., 2012)

Namun, jika masing- masing pita memiliki tingkat (Kuasi) Fermi, maka akan terjadi hubungan $elektron \times hole \propto e^{\frac{\Delta E}{k_B T}}$ dengan ΔE merupakan energi gap. Sementara itu, rate rekombinasi radiatif berbanding lurus terhadap seberapa sering elektron menumbuk hole, sehingga rekombinasi radiatif \propto elektron \times hole. Sehingga, jika sel surya dipasang di dalam rangkaian listrik, tegangannya akan menjadi lebih kecil dibanding dengan nilai QFL sehingga mempengaruhi performansi sel surya yang membuat sel surya memiliki batas nilai efisiensi maksimum.

Ketika suatu kristal silikon di-*doping* dengan unsur golongan kelima, maka atom-atom arsen itu akan menempati ruang diantara atom-atom silikon yang mengakibatkan munculnya elektron bebas pada material campuran tersebut. Elektron bebas tersebut berasal dari kelebihan elektron yang dimiliki oleh arsen terhadap lingkungan sekitarnya, dalam hal ini adalah silikon. Semikonduktor jenis ini kemudian diberi nama semikonduktor tipe-n. Sebaliknya terjadi jika kristal silikon di-*doping* oleh unsur golongan ketiga, misalnya boron, maka kurangnya elektron valensi boron dibandingkan dengan silikon mengakibatkan munculnya *hole* yang bermuatan positif pada semikonduktor tersebut. Semikonduktor ini dinamakan semikonduktor tipe-p (Philipps et al., 2012).

Adanya tambahan pembawa muatan tersebut mengakibatkan semikonduktor ini akan lebih banyak menghasilkan pembawa muatan ketika diberikan sejumlah energi tertentu, baik pada semikonduktor tipe-n maupun tipe-p. Ketika semikonduktor tipe-p dan tipe-n disambungkan maka akan terjadi difusi *hole* dari tipe-p menuju tipe-n dan difusi elektron dari tipe-n menuju tipe-p. Difusi tersebut akan meninggalkan daerah yang lebih positif pada batas tipe-n dan daerah lebih negatif pada batas tipe-p. Batas tempat terjadinya perbedaan muatan pada sambungan p-n disebut dengan daerah deplesi. Adanya perbedaan muatan pada daerah deplesi akan mengakibatkan munculnya medan listrik yang mampu menghentikan laju difusi selanjutnya. Medan listrik tersebut mengakibatkan munculnya arus *drift*. Namun arus ini terimbangi oleh arus difusi sehingga secara keseluruhan tidak ada arus listrik yang mengalir pada semikonduktor sambungan p-n tersebut (Hagfeldt, Cappel, Boschloo, & Sun, 2012).

Ketika semikonduktor sambungan p-n disinari maka akan terjadi pelepasan elektron dan hole pada semikonduktor tersebut. Lepasnya pembawa muatan tersebut mengakibatkan penambahan kuat medan listrik di daerah deplesi. Adanya kelebihan muatan ini akan mengakibatkan muatan ini bergerak karena adanya medan listrik pada daerah deplesi. Pada keadaan ini, arus *drift* lebih besar daripada arus difusi sehingga secara keseluruhan dihasilkan arus berupa arus *drift*, yaitu arus yang dihasilkan karena kemunculan medan listrik. Arus inilah yang kemudian dimanfaatkan oleh sel surya sambungan p-n sebagai arus listrik (Green, 2012).

Sinar matahari yang tersusun dari foton- foton dengan berbagai panjang gelombang akan mengenai *absorber* pada permukaan sel surya yang kemudian akan diteruskan menuju lapisan- lapisan dalam sel surya. Hanya foton dengan nilai energi tertentu yang akan bereksitasi. Jika energi pada foton mengenai lapisan bermuatan negative dalam sel surya dimana frekuensinya lebih besar daripada frekuensi ambang lapisan bermuatan negatif, maka elektron tersebut akan bereksitasi menuju lapisan bermuatan positif dibawahnya. Hal tersebut yang dapat menimbulkan aliran listrik. Energi yang dimiliki foton disebut juga sebagai energi *bandgap*.

Bahan semikonduktor memiliki kemampuan untuk menyerap energi cahaya pada elektron dan hole-nya dan mengkonversikan menjadi arus listrik. Bahan semikonduktor dipilih berdasarkan bagaimana bahan tersebut dapat menyerap

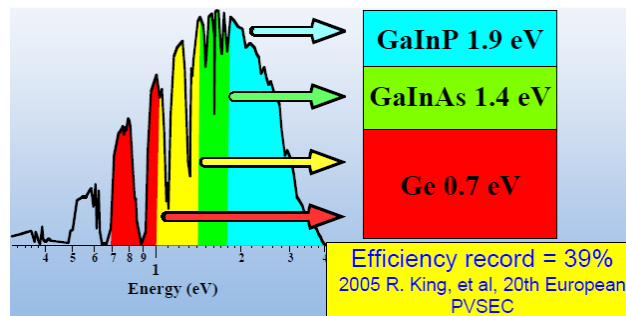
spektrum matahari. Pada Silikon dan Galium Arsenide, bahan- bahan tersebut memiliki rentang spektrum yang cukup lebar karena daya penyerapannya besar. Selain itu, GaAs juga memiliki massa pembawa muatan efektif yang kecil. Bahan semikonduktor GaAs dapat dikombinasikan dengan AlAs membentuk multijunction AlAs-InGaP. Untuk itu, kebanyakan sel surya adalah dengan menggunakan bahan semikonduktor (Andreev, 2012). Tabel 2.1 menunjukkan beberapa bahan semikonduktor dengan *bandgap* yang berbeda.

Tabel 2. 1 Daftar energi *bandgap* pada beberapa bahan semikonduktor

Material sistem A/B	E_g^A (eV)	E_g^B (eV)	ΔE_v (eV)	$\Delta E_v / \Delta E_g$
Si/GaP	1,12	2,25	+0,80	0,71
Si/GaAs	1,12	1,42	+0,05	0,17
Si/GaSb	1,12	0,72	-0,05	0,12
Ge/AlAs	0,67	2,15	+0,92	0,62
Ge/GaAs	0,67	1,42	+0,25 - +0,65	0,33 – 0,87
Ge/InP	0,67	1,34	+0,64	0,95
AlAs/GaAs	2,15	1,42	-0,40	0,55
$Al_{0,3}Ga_{0,7}As/GaAs$	1,79	1,42	-0,12	0,32
AlSb/GaSb	1,61	0,72	-0,4	0,45
GaAs/InAs	1,42	0,36	-0,17	0,16
GaAs/ZnSe	1,42	2,70	+0,96 - +1,00	0,75 – 0,86
GaSb/InAs	0,72	0,36	+0,46	1,28
InP/CdS	1,34	2,42	+1,63	1,51
$Al_{0,48}In_{0,52}As/ Ga_{0,47}In_{0,53}As$	1,45	0,75	-0,21	0,30
$Ga_{0,52}In_{0,48}P/GaAs$	1,88	1,42	-0,23	0,50
$Al_{0,48}In_{0,52}As/InP$	1,45	1,34	+1,19	1,73
$Ga_{0,47}In_{0,53}As/InP$	0,75	1,34	+0,40	0,68

Agar efisiensi sel surya dapat ditingkatkan, maka foton yang berasal dari sinar matahari harus bisa diserap sebanyak-banyaknya dengan cara memperkecil harga rekombinasi dan refleksi serta memperbesar konduktivitas pada bahan sel surya. Tidak semua foton dapat terserap sempurna dan dikonversikan di dalam sel surya, hanya energi foton yang mendekati energi *bandgap* semikonduktor yang dapat digunakan secara efektif (Mart & Luque, 2004).

Untuk dapat membuat foton terserap sebanyak- banyaknya, maka absorber harus memiliki energi *bandgap* dengan range yang lebar (Yang & Pan, 2015). Sel surya *multijunction* terdiri dari beberapa susunan P-N *junction* yang diurutkan berdasarkan energi bandgap (E_g) yang dimiliki, dimana lapisan paling atas memiliki nilai E_g terbesar yang akan menyerap radiasi matahari dengan daerah spektrum panjang gelombang yang rendah. Lapisan berikutnya memiliki nilai E_g yang lebih rendah daripada lapisan pertama dan akan menyerap radiasi matahari dengan daerah spektrum panjang gelombang yang lebih besar.



Gambar 2.6 Range spektrum yang diserap masing-masing lapisan sel (Kurtz, Olson, Geisz, Wanlass, & McMahon, 2006)

2.3 Efisiensi Sel Surya

Hal yang paling menarik pada tiap penelitian mengenai sel surya adalah bagaimana cara untuk meningkatkan nilai efisiensi pada sel surya tersebut. Efisiensi adalah sifat terpenting yang mempengaruhi performa sebuah perangkat sel surya (Markvart, Mcevoy, Castañer, Martí, & Luque, 2011)

Arus keluaran yang dihasilkan oleh sel surya dapat digunakan sebagai salah satu tolak ukur dalam menentukan efisiensi sel surya tersebut. Dalam hal ini berlaku hubungan

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{I_{out} \times V_{out}}{I_{in} \times V_{in}} \quad (2.3)$$

Sehingga, $\eta \approx I_{out}$. Nilai I_{out} didapat dari persamaan (2.4)

$$I_{out} = J \times A \quad (2.4)$$

Dimana J adalah rapat arus yang dihasilkan sel surya dan A merupakan luas dimensi sel. Ada beberapa hal yang mempengaruhi besar rapat arus sel surya, yaitu diantaranya adalah medan listrik dan konsentrasi elektron dan hole yang terdapat di dalam sel (Mahakud, 2014)

2.3.1 Medan Listrik

Gelombang elektromagnetik adalah gelombang yang dapat merambat walau tidak ada medium. Dari hal tersebut, James Clerk Maxwell mengemukakan 4 persamaan yang dikenal sebagai hukum Maxwell, yaitu

$$\begin{aligned} (\text{divergensi}) \nabla D &= \rho & (\text{divergensi}) \nabla B &= 0 \\ (\text{curl}) \nabla E &= -\frac{\partial B}{\partial t} & (\text{curl}) \nabla H &= J + \frac{\partial D}{\partial t} \end{aligned} \quad (2.5)$$

Selain 4 persamaan tersebut, terdapat satu persamaan lagi yang juga merupakan bagian dari persamaan Maxwell dan digunakan dalam menentukan medan listrik yang dihasilkan oleh sel surya di dalam penelitian ini (Smith, 2007)

$$\nabla \times \mu_r^{-1} (\nabla \times E) - k_0^2 \left(\epsilon_r - \frac{\sigma}{\omega \epsilon_0} \right) E = 0 \quad (2.6)$$

dimana E merupakan medan listrik (N/m), ϵ_r merupakan permitivitas relatif bahan, μ_r menyatakan permeabilitas relatif bahan dan k_0 merupakan konstanta penalaran gelombang. Di dalam suatu bahan semikonduktor, semakin tinggi level energi dalam suatu sumber energi, semakin rendah panjang gelombang dari energi yang dihasilkan, dan semakin tinggi frekuensinya. Hal tersebut dapat dilihat dari intensitas cahaya yang dipancarkan kembali oleh sel surya, melalui persamaan:

$$P = |\vec{E} \times \vec{B}| \quad (2.7)$$

dengan P adalah daya yang dihasilkan pada sel surya. Sedangkan untuk mendapatkan intensitas cahaya yang dipancarkan kembali oleh sel surya, digunakan persamaan

$$I = \frac{P}{A} \quad (2.8)$$

Dimana A adalah luas permukaan sel surya dan I adalah intensitas cahaya (watt/m²).

Dalam keluaran 1 A, elektron yang terkandung adalah sebanyak $1,6 \times 10^{19}$. Dengan menggunakan persamaan rapat arus (J) dan medan listrik (E), didapatkan (Philipps, Hermle, & Letay, 2008)

$$J = \sigma E \quad (2.9)$$

Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa arus dan medan listrik saling berbanding lurus. Yang itu artinya, makin besar arus yang dikeluarkan, maka medan listrik yang dihasilkan juga akan makin besar.

2.3.2 Konsentrasi hole dan elektron

Selain medan listrik, konsentrasi elektron dan hole juga menjadi parameter dalam menentukan nilai arus keluaran sel surya melalui persamaan

$$J = eN_C N_V \left[\frac{1}{N_A} \sqrt{\frac{D_n}{\tau_n}} + \frac{1}{N_D} \sqrt{\frac{D_p}{\tau_p}} \right] \exp \left(-\frac{E_g}{kT} \right) \quad (2.10)$$

Dimana: e = muatan elektron ($1,6 \times 10^{-19}$ C)

N_A dan N_D = konsentrasi donor dan akseptor (cm^{-3})

N_C dan N_V = konsentrasi pita konduksi dan valensi (cm^{-3})

D_N dan D_P = konstanta difusi elektron dan hole (cm^2/s)

τ_N dan τ_P = *lifetime* elektron dan hole

Medan listrik (ε) didapatkan dengan menurunkan persamaan (2.6). Sementara p dan n di dapatkan dari persamaan

$$n = 2\sqrt{n_0 N_V} e^{\frac{E_f - E_g}{2kT}} \text{ dan } p = 2\sqrt{p_0 N_C} e^{\frac{E_g - E_f}{2kT}} \quad (2.11)$$

dengan E_g adalah energi gap (Ev). Untuk N_V dan N_C masing-masing adalah konsentrasi pada pita konduksi dan pita valensi (mol/m^3) yang didapatkan dari persamaan

$$N_C = 2\sqrt{\left(\frac{2\pi\mu_n kT}{h^2}\right)^3} \text{ dan } N_V = 2\sqrt{\left(\frac{2\pi\mu_p kT}{h^2}\right)^3} \quad (2.12)$$

Sementara E_f merupakan energi fermi dengan persamaan (Lundstrom, 2011)

$$E_f = \frac{E_g}{2} + \frac{3kT}{4} \ln \left(\frac{N_V}{N_C} \right) \quad (2.13)$$

Sedangkan untuk konsentrasi elektron dan hole di dapatkan dengan menyederhanakan persamaan (2.14)

$$\nabla \cdot (-Di \nabla Ci + u Ci) = Ri \quad (2.14)$$

Dalam hal ini, persamaan (2.14) disebut sebagai persamaan difusi dimana u merupakan kecepatan dan Ri sebagai produk yang merupakan fungsi dari konsentrasi.

2.4 Melakukan Perhitungan Sel Surya

Setelah mendapatkan desain sel surya dan mendapatkan parameter-parameternya, kemudian digunakan persamaan maxwell seperti (2.6) dan persamaan difusi seperti pada (2.14) dengan menggunakan model 2D untuk mendapatkan hasilnya yang kemudian akan dianalisis.

Dalam desain sel surya ini, digunakan 3 macam lapisan yang berbeda yang akan didesain, yaitu *double junction* (AlAs-InGaP), *triple junction* (AlAs-InGaP-GaSb) dan *multi junction* (AlAs-InGaP-GaSb-InAs). Pada desain sel surya ini, parameter yang dibuat bervariasi adalah *bandgap* sel surya dan dimensi dari sel tersebut, dimana terdapat 3 macam ketebalan yang akan dibuat bervariasi dalam penelitian ini yaitu ketebalan 40 μm ; 60 μm dan 70 μm . Pemilihan variasi ini didasarkan karena pada umumnya, sel surya berukuran 1,52 x 0,86 x 0,045 mm (*length x width x depth*) dengan terdiri dari 60- 100 sel termasuk dengan lapisan anti refleksi pada bagian paling atas dan lapisan *back metalization* pada bagian paling bawah (Manzolini & Humphrey, 2013)

Melalui perhitungan analitis ini, parameter- parameter yang akan dijabarkan dalam tabel 3.1, 3.2 dan 3.3 pada setiap dimensi sel surya akan dianalisis hasilnya.

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

Bab ini membahas tentang alur penelitian analisis sel surya *multijunction* berbahan semikonduktor III-V. Dimulai dari studi literatur, permodelan sel surya *multi-junction* dengan variasi *bandgap* dan dimensi sel surya dan analisis pengaruhnya terhadap arus dan efisiensi yang dihasilkan. Selain itu, alur permodelan dalam penelitian juga akan dibahas di dalam bab ini.

3.1 Menentukan Variabel Sel Surya

Menentukan variabel-variabel bahan dilakukan untuk menunjang pencapaian tujuan dan pemecahan masalah dengan menentukan parameter- parameter bahan semikonduktor golongan III-V. Sebagai tahap awal dari penelitian sel surya bervariasi *bandgap* dan dimensi ini, menentukan parameter terhadap sel surya sangatlah penting. Parameter yang ditentukan adalah komposisi penyusun sel surya yaitu bahan *compound crystal* semikonduktor III-V dengan menggunakan metode P-N *multijunction* melalui desain 2D (Mahakud, 2014).

Beberapa jurnal serta buku digunakan untuk menentukan parameter terikat yang digunakan dalam perhitungan sel surya. Variabel- variabel terikat tersebut ditunjukkan dalam tabel 3.1, 3.2 dan 3.3 (Nainani, Bennett, Boos, Ancona, & Krishna, 2012).

Tabel 3.1 Parameter *bandgap*, mobilitas elektron dan hole (Schubert, 2015)

Material	Eg (eV)	Mobilitas elektron (cm ² /Vs)	Mobilitas hole (cm ² /Vs)
AlAs	2,15	1000	100
GaSb	0,72	3000	800
GaAs	1,42	3088	400
InAs	0,36	5000	450
InGaP	1,86	1074 (Arafat& Hassan, 2012)	40 (Nainani et al., 2012)

Selain *bandgap*, mobilitas elektron (μ_n) dan mobilitas hole (μ_p), beberapa parameter lain yang digunakan pada perhitungan sel surya dengan semikonduktor

compound crystal III-V yaitu carrier life-time (τ), hole diffusion (D_p), electron diffusion (D_n), afinitas elektron (χ) dan permitivitas relatif (ϵ_r) seperti tabel dibawah

Tabel 3.2 Life-time dan konstanta difusi muatan elektron dan muatan hole (Kroemer, 2004)

Bahan	Carrier lifetime (s)	Hole difusion (cm ² /s)	Electron difusion (cm ² /s)
AlAs	0,1	2,6	5,2
GaSb	0,8	25	75
InAs	0,1	12	850
InGaP	0,2 (Ahrenkiel, 1992)	11	28

Tabel 3.3 Konsentrasi elektron pada pita valensi dan konduksi (Adachi, 2005)

Material	N _V (cm ³)	N _C (cm ³)
AlAs	7,6 x 10 ¹⁸	3,67 x 10 ¹⁹
InGaP	7 x 10 ¹⁸	2,1 x 10 ¹⁹
GaSb	6,2 x 10 ¹⁸	7,6 x 10 ¹⁸
InAs	2,5 x 10 ¹⁸	4,7 x 10 ¹⁸

Tabel 3.4 Afinitas elektron, fungsi kerja dan permitivitas semikonduktor.

Material	χ (eV)	Φ^I	ϵ_s^I
AlAs	3,5	4,53	10,06
InGaP	4,07	**	11,8 ⁱⁱ
GaSb	4,06	4,68	12,5
InAs	4,9	4,55	14,6

3.2 Melakukan Desain Sel Surya

Desain sel surya ini terdiri dari tiga macam, yaitu sel surya *double junction* AlAs-InGaP, sel surya *triple junction* AlAs-InGaP-GaSb dan sel surya *multi junction* AlAs-InGaP-GaSb-InAs. Pada penelitian ini, juga dilakukan variasi terhadap konsentrasi doping pada tipe-n dan p masing-masing semikonduktor.

^I W. Liu, W.T. Zheng, Q. Jiang, First-principles study of the surface energy and work function of III-V semiconductor compounds, *Physical Review B* **75**, 235322 (2007)

3.3 Melakukan Perhitungan dan Analisis Sel Surya

Setelah menentukan parameter-parameter bahan yang digunakan untuk mendesain sel surya pada 2D seperti pada tabel 3.1, 3.2 dan 3.3, kemudian dilakukan perhitungan dan analisis terhadap nilai medan listrik yang dihasilkan dan konsentrasi elektron-hole yang terkandung di dalam sel dalam keterkaitannya terhadap besar rapat arus dan efisiensi yang dimiliki oleh sel surya tersebut.

Persamaan medan listrik yang didapatkan dari persamaan Maxwell yaitu dijabarkan pada persamaan (2.6). Kemudian, untuk konsentrasi elektron dan hole di dalam sel surya dijabarkan melalui persamaan difusi (2.14). Persamaan (2.6) dan (2.14) kemudian di turunkan untuk mendapatkan nilai medan listrik dan konsentrasi yang terdapat di dalam sel surya. Nilai medan listrik dan konsentrasi ini bervariasi mengingat desain sel surya dalam penelitian ini memiliki *bandgap* dan dimensi yang berbeda-beda.

Setelah didapatkan besar medan listrik dan konsentrasi yang terkandung di dalam sel surya tersebut, dilakukan perhitungan dan analisa terhadap nilai arus yang dihasilkan oleh surya. Arus yang didapatkan dari perhitungan ini, nilainya bergantung pada besar medan listrik dan konsentrasi sel surya. Sebelum mendapatkan nilai arus, dihitung terlebih dahulu besar rapat arusnya (J) dengan menggunakan persamaan dari (2.10). Kemudian, setelah mendapatkan nilai rapat arus keluaran sel surya, dilakukan perhitungan untuk mendapatkan efisiensi yang terkandung di dalam sel surya tersebut dengan menggunakan persamaan efisiensi pada bahan semikonduktor ekstrinsik adalah sebagai berikut (Rana, 2011)

$$\eta_{max} \approx \frac{\left[\frac{eV_{mp}}{kT}\right] V_{mp} J_s}{\left[1 + \frac{eV_{mp}}{kT}\right] N_{ph} \epsilon_{av}} \quad (3.1)$$

dimana N_{ph} merupakan jumlah foton di dalam spektrum matahari, ϵ_{av} untuk energi rata-rata pada tiap foton. Dalam keadaan dimana cahaya matahari memancar pada siang hari, memiliki jumlah foton sebanyak $2,1 \times 10^{17}$ /sec.cm² dengan energi rata-ratanya 1,08eV. Sedangkan J_s adalah rata-rata rapat arus (A/m²) di dalam sel surya yang telah dihitung terlebih dahulu dan untuk V_{mp} , didapatkan melalui persamaan

$$e^{\left[\frac{eV_{mp}}{kT}\right]} \left[1 + \frac{eV_{mp}}{kT}\right] = e^{\left[\frac{eV_{oc}}{kT}\right]} \quad (3.2)$$

Dengan V_{oc} adalah tegangan rangkaian terbuka yang didapatkan dari persamaan

$$V_{oc} = \frac{kT}{q} \ln \left[\frac{J_s}{J_o} + 1 \right] \quad (3.3)$$

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHSAN

Bab ini membahas tentang hasil- hasil yang diperoleh dari desain sel surya melalui terhadap medan listrik yang dihasilkan dan konsentrasi *hole*-elektron yang terdapat di dalam sel surya beserta analisisnya. Nilai medan listrik dan konsentrasi hole-elektron akan berkaitan terhadap rapat arus yang dapat dihasilkan oleh sel surya tersebut dan mempengaruhi performasi keluarannya.

4.1 Karakteristik Diagram Pita Energi pada Sel Surya *Multijunction*

Diagram pita energi P-N sel surya *multijunction* ditunjukkan pada Gambar 4.1, 4.2 dan 4.3 dengan konsentrasi donor dan akseptor yang berbeda-beda yang masing-masing bernilai $10^{15}/\text{cm}^3$, $10^{17}/\text{cm}^3$ dan $10^{19}/\text{cm}^3$ untuk membandingkan posisi energi fermi dan nilai tegangan perintang (V_{bi}) pada masing-masing sel surya dengan konsentrasi yang berbeda. Selain itu juga untuk mengamati bagaimana elektron dapat mengalir dari lapisan paling atas menuju lapisan yang paling bawah. Pada diagram pita energi terdapat Energi fermi (E_f), Energi pada pita konduksi (E_C) dan Energi pada pita valensi (E_V) serta lebar deplesi (z). Energi fermi (E_f) merupakan tingkat energi tertinggi yang dapat diisi oleh suatu elektron pada suhu tertentu. Elektron pada tingkat energi fermi dapat disebut juga sebagai elektron bebas. Nilai E_f didapatkan dari persamaan (4.1) berikut ini.

Tipe N:
$$E_{fn} - E_{in} = kT \ln \left(\frac{N_D}{N_i} \right)$$
 (4.1)

Tipe P:
$$E_{fp} - E_{ip} = kT \ln \left(\frac{N_A}{N_i} \right)$$

Nilai N_v dan N_c yang masing-masing merupakan nilai konsentrasi pada pita valensi dan konduksi didapatkan melalui referensi yang dapat dilihat pada Tabel 3.3. Untuk nilai E_C dan E_V , didapatkan melalui persamaan

Tipe N:
$$E_C - E_f = kT \ln \left(\frac{N_v}{N_c} \right)$$
 (4.2)

Tipe P:
$$E_f - E_V = kT \ln \left(\frac{N_v}{N_A} \right)$$

Pada diagram pita energi, ditentukan terlebih dahulu konsentrasi intrinsik (n_i) dan tegangan perintang (V_{bi}) pada tiap sambungan n-p. Untuk sambungan n-p yang sejenis, digunakan persamaan

$$n_i = \sqrt{N_C N_V} \exp\left(-\frac{E_g}{2kT}\right) \quad (4.3)$$

$$V_{bi} = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{N_A N_D}{n_i^2}\right) \quad (4.4)$$

dan lebar deplesi z:

$$z = \sqrt{\frac{2\epsilon_s}{q} \left(\frac{N_A + N_D}{N_A N_D}\right) V_{bi}} \quad (4.5)$$

Sementara untuk sambungan n-p yang tidak sejenis, dapat menggunakan persamaan sebagai berikut

$$V_{bi} = \frac{\Delta E_C - \Delta E_v}{2} + kT \ln \frac{N_A N_D}{n_{i,n} n_{i,p}} \quad (4.6)$$

$$z = x_n + x_p = \sqrt{\frac{2\epsilon_{s,n} \epsilon_{s,p}}{q} \frac{(N_A + N_D)^2}{N_A N_D (N_A \epsilon_{s,p} + N_D \epsilon_{s,n})} V_{bi}} \quad (4.7)$$

$$\Delta E_C = q(\chi_2 - \chi_1) \quad (4.8)$$

$$\Delta E_v = E_{g1} + q\chi_1 - (E_{g2} + q\chi_2) = \Delta E_g - \Delta E_C \quad (4.9)$$

Hasil perhitungan dari persamaan-persamaan di atas dapat dilihat pada Tabel 4.1-2.

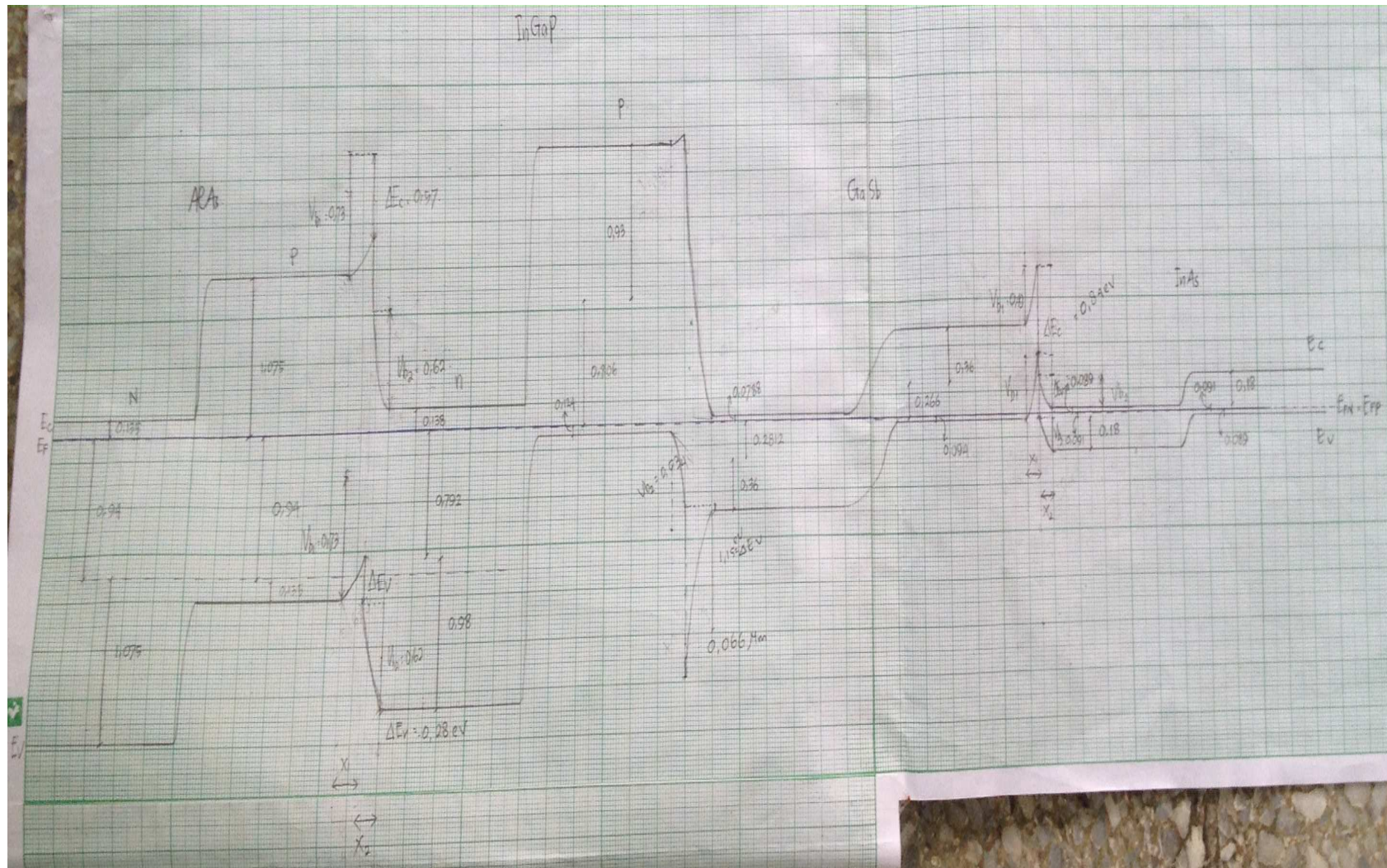
Tabel 0.1 Hasil perhitungan pembawa muatan intrinsik

Material	AlAs	InGaP	GaSb	InAs
n_i	15,74	$3,0853 \times 10^3$	$3,3 \times 10^{12}$	3×10^{15}

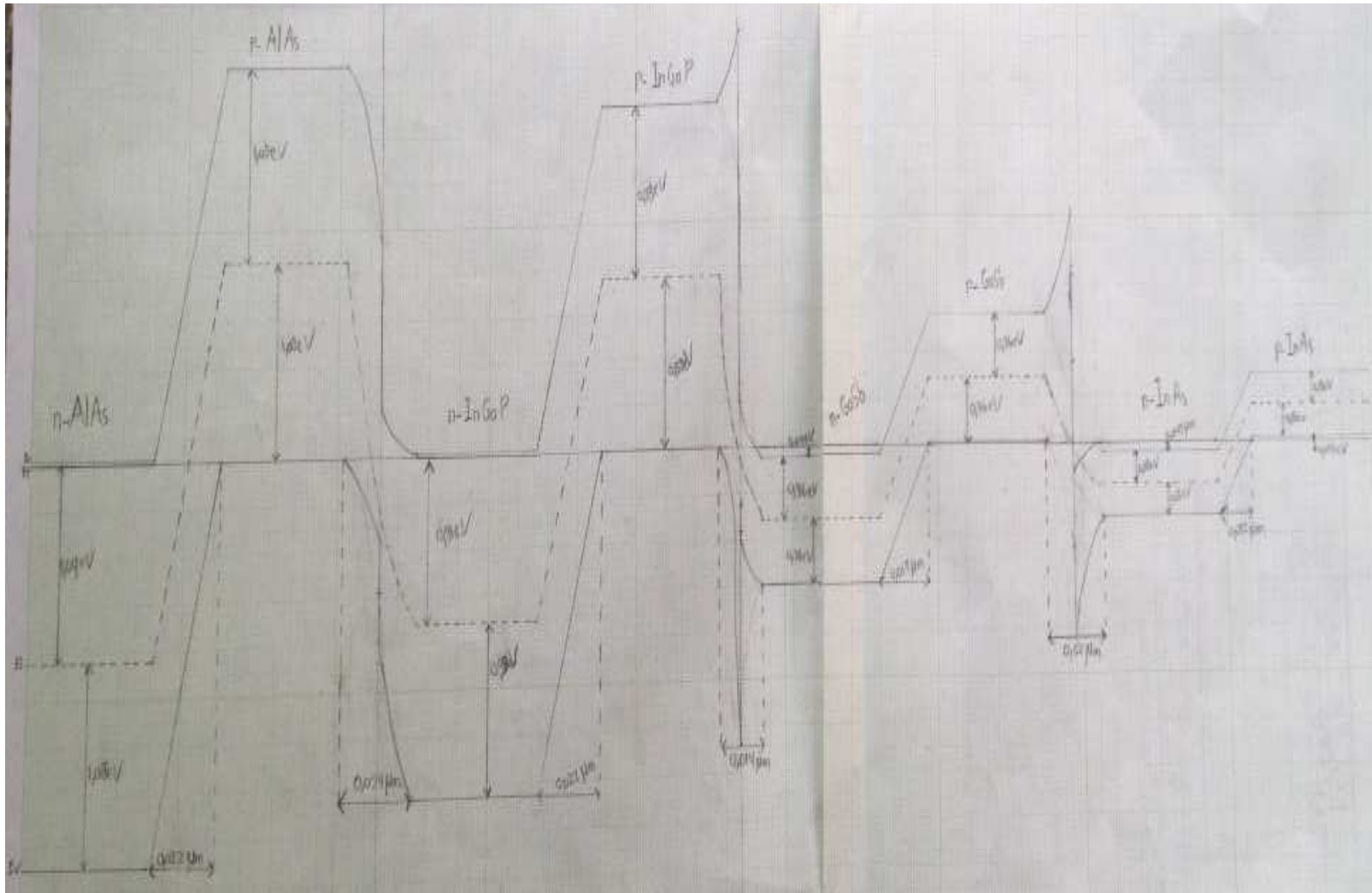
Tabel 0.2 Parameter yang digunakan dalam diagram pita energi.

$N_A=N_D=10^{15} \text{ cm}^{-3}$					
Material	V_{bi}	Z (cm)	$E_{Fn}-E_{in}$	$E_{Fp}-E_{ip}$	$E_{Fn}-E_{Fp}$
AlAs	1,646	$1,9 \times 10^{-4}$	0,823	0,823	0,823
InGaP	1,3729	$1,89 \times 10^{-4}$	0,06864	0,06864	0,684
GaSb	0,3959	$1,0138 \times 10^{-4}$	0,1479	0,1479	0,1479
InAs	0,056	$7,43 \times 10^{-5}$	-0,028	-0,028	0,028
$N_A=N_D=10^{17} \text{ cm}^{-3}$					
AlAs	1,88	$2,045 \times 10^{-5}$	0,94	0,94	0,94
InGaP	1,61	$2,0501 \times 10^{-5}$	0,806	0,806	0,792
GaSb	0,533	$1,354 \times 10^{-5}$	0,2668	0,2668	0,2812
InAs	0,27	$9,3 \times 10^{-6}$	0,091	0,091	0,091
$N_A=N_D=10^{19} \text{ cm}^{-3}$					
AlAs	2,080	$3,1516 \times 10^{-6}$	1,061	1,061	1,0414
InGaP	1,82	$2,179 \times 10^{-6}$	0,925	0,925	0,911
GaSb	0,80	$1,667 \times 10^{-6}$	0,386	0,386	0,4
InAs	0,46	$1,219 \times 10^{-6}$	0,210	0,210	0,227

$N_A=N_D=10^{15} \text{ cm}^{-3}$						
Material	V_{bi}	x_p	x_n	W	$E_{Fp}-E_{Vp}$	$E_{Cn}-E_{Fn}$
AlAs/InGaP	0,8008	$6,94 \cdot 10^{-5}$	$6,94 \cdot 10^{-5}$	$1,388 \cdot 10^{-4}$	0,231	0,258
InGaP/GaSb	0,3026	$4,51 \cdot 10^{-5}$	$4,51 \cdot 10^{-5}$	$9,020 \cdot 10^{-5}$	0,229	0,198
GaSb/InAs	-0,8973	$8,18 \cdot 10^{-5}$	$8,18 \cdot 10^{-5}$	$1,636 \cdot 10^{-4}$	0,226	0,191
$N_A=N_D=10^{17} \text{ cm}^{-3}$						
AlAs/InGaP	1,039	$7,90 \cdot 10^{-6}$	$7,90 \cdot 10^{-6}$	$1,580 \cdot 10^{-5}$	0,112	0,138
InGaP/GaSb	0,5411	$6,03 \cdot 10^{-6}$	$6,03 \cdot 10^{-6}$	$1,206 \cdot 10^{-5}$	0,110	0,0789
GaSb/InAs	-0,6587	$7,00 \cdot 10^{-6}$	$7,00 \cdot 10^{-6}$	$1,400 \cdot 10^{-5}$	0,107	0,0718
$N_A=N_D=10^{19} \text{ cm}^{-3}$						
AlAs/InGaP	1,278	$8,76 \cdot 10^{-7}$	$8,76 \cdot 10^{-7}$	$1,752 \cdot 10^{-6}$	-0,00711	0,0192
InGaP/GaSb	0,7797	$7,24 \cdot 10^{-7}$	$7,24 \cdot 10^{-7}$	$1,448 \cdot 10^{-6}$	-0,00924	-0,0404
GaSb/InAs	-0,4202	$5,59 \cdot 10^{-7}$	$5,59 \cdot 10^{-7}$	$1,118 \cdot 10^{-6}$	-0,0124	-0,0475



Gambar 4.2 Diagram pita energi rancangan sel surya untuk konsentrasi akseptor dan donor 10^{17} cm^{-3} .

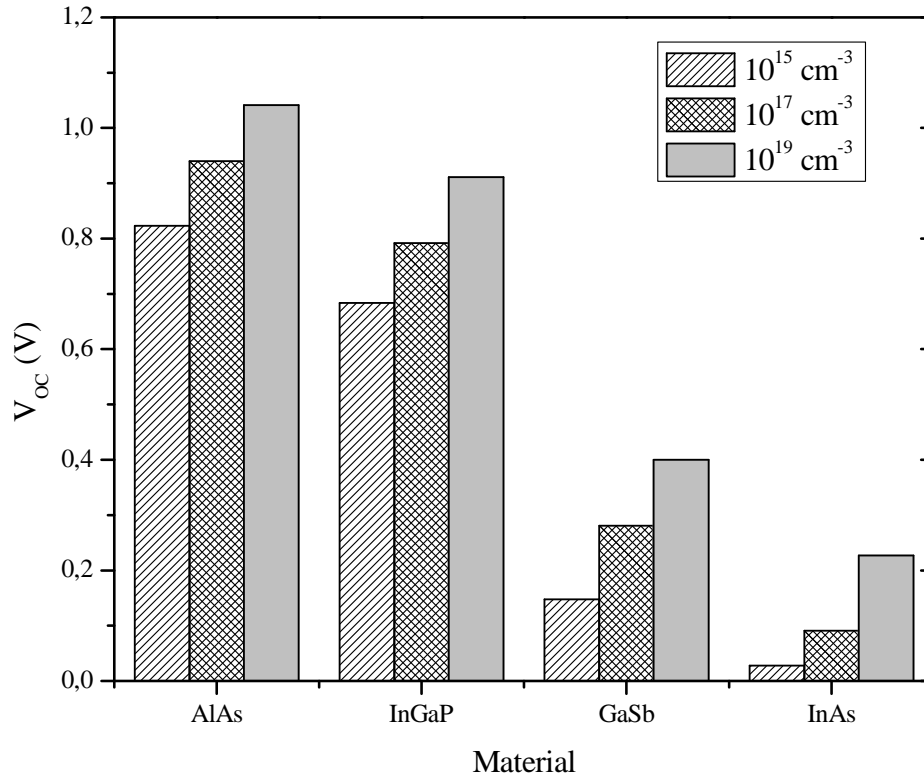


Gambar 4.3 Diagram pita energi rancangan sel surya untuk konsentrasi akseptor dan donor 10^{19} cm^{-3} .

Estimasi tegangan rangkaian terbuka (V_{OC}) dapat dilakukan dengan menggunakan persamaan:

$$V_{OC} \approx \frac{E_{Fn} - E_{Fp}}{q} \quad (4.10)$$

Dari Tabel 4.2 dapat dilihat bahwa material AlAs yang berkontribusi besar terhadap nilai V_{OC} , sedangkan InAs menghasilkan V_{OC} paling rendah. Bertambahnya konsentrasi donor dan akseptor juga memperbesar nilai V_{OC} (Gambar 4.4).



Gambar 4.4 Estimasi V_{OC} dan pengaruh konsentrasi donor dan akseptor pada sambungan *homojunction* rancangan sel surya.

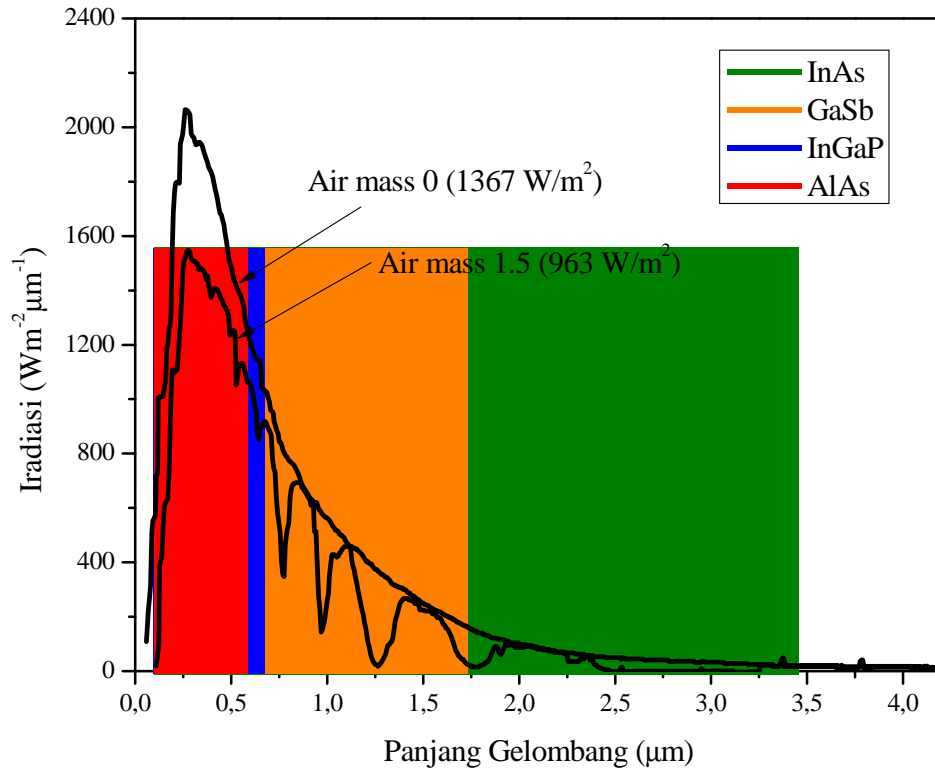
4.2 Analisis Optis dan Ketidaksesuaian Kristal Semikonduktor Yang Digunakan Dalam Rancangan Sel Surya

Berdasarkan *energy gap* semikonduktor yang dipilih dapat ditentukan panjang gelombang *cut-off* dengan menggunakan persamaan (4.11) dan hasil perhitungannya dapat dilihat pada Tabel 4.3 dan Gambar 4.5.

$$\lambda_c = \frac{\hbar c}{E_g} = \frac{1,24}{E_g (\text{eV}) \mu\text{m}} \quad (4.11)$$

Tabel 0.3 Panjang gelombang *cut-off* dari semikonduktor yang digunakan

Material	AlAs	InGaP	GaSb	InAs
λ_c (μm)	0,576	0,666	1,722	3,444



Gambar 4.5 Irradiasi cahaya matahari pada AM 0 dan AM 1.5 dan panjang gelombang *cut-off* dari semikonduktor yang digunakan.

Dari Gambar 4.5 terlihat bahwa material yang digunakan mempunyai bandgap yang memiliki rentang panjang gelombang yang lebar. Hal ini mengindikasikan bahwa seharusnya koefisien absorpsi dari sel surya menjadi semakin tinggi. Namun demikian, perlu dilakukan validasi karakteristik *bandgap* dan ketidaksesuaian kisi kristal (*lattice mismatch*) dari semikonduktor yang dipilih tersebut.

Tabel 0.4 Karakteristik bandgap dan parameter kisi kristal semikonduktor

Material	Jenis Bandgap	Parameter Kisi (nm)
AlAs	Indirect	0,5660
InGaP	Indirect	0,5653
GaSb	Direct	0,609
InAs	Direct	0,605

Dari jenis bandgap-nya, semikonduktor AlAs dan InGaP mempunyai bandgap *indirect*. Sama dengan silikon, material yang mempunyai *bandgap indirect* bukan merupakan penyerap cahaya yang baik. Dari sisi absorbansi *bandgap direct* dan *indirect* dapat didekati dengan persamaan berikut:

$$\alpha(h\nu) \propto A(E_{\text{cahaya}} - E_g)^{1/2} \quad (4.12)$$

$$\alpha(h\nu) \propto B(E_{\text{cahaya}} - E_g)^2 \quad (4.13)$$

dengan α adalah koefisien absorpsi, A dan B adalah konstanta antara 10^5 - 10^6 cm^{-1} untuk bandgap *direct* dan *indirect*. Dari persamaan (4.12-13) dapat dilihat bahwa bandgap *indirect* membutuhkan E_{cahaya} yang besar agar elektron berpindah dari pita valensi ke pita konduksi, dengan kata lain semikonduktor dengan bandgap *indirect* jika akan digunakan sebagai sel surya, maka lapisan yang dibuat harus cukup tebal.

Hal lain yang perlu diperhatikan adalah ketidaksesuaian kisi. Ketidaksesuaian kisi antara semikonduktor yang digunakan dapat menimbulkan cacat kisi yang disebut dengan *dangling bond*. Cacat tersebut berpotensi sebagai tempat terjadinya rekombinasi hole dan elektron. Dengan menggunakan persamaan:

$$f = \frac{[a_0(s) - a_0(f)]}{a_0(f)} \quad (4.14)$$

dengan tanda s dan f adalah substrat dan film, serta menggunakan data para Tabel 4.4, maka diperoleh ketidaksesuaian kisi semikonduktor AlAs/InGaP, InGaP/GaSb dan GaSb/InAs sebesar -0,00124, 0,077304 dan -0,00657. Tanda positif menunjukkan terjadinya regangan sedangkan tanda negatif menunjukkan terjadinya kompresi. Secara keseluruhan nilai ketidaksesuaian kisi material yang dipilih tidak terlalu besar, sehingga dapat dikatakan probabilitas adanya cacat *dangling bond* juga tidak terlalu besar.

4.3 Analisis Transfer Elektron di Dalam Sel Berdasarkan Diagram Pita Energi

Pendekatan yang dilakukan adalah dengan menguji probabilitas kontribusi elektron bergerak melalui emisi termionik atau penerobosan. Untuk menguji bagaimana elektron bergerak di dalam sistem secara emisi termionik, maka persamaan densitas elektron berikut ini digunakan:

$$n_{th} = N_c \exp \left[- \frac{q(\chi + V_n)}{kT} \right] \quad (4.15)$$

dimana N_c adalah densitas efektif keadaan pada pita konduksi dan V_n adalah selisih antara pita konduksi dan level Fermi (Gambar 4.1-3)

Menurut persamaan (4.15), elektron dengan energi lebih besar daripada $q\chi$ dapat diemisikan secara termionik.² Hasil dari perhitungan tersebut ditabulasi seperti pada Tabel 4.5 Secara umum harga n_{th} sangat kecil, sehingga dapat disimpulkan bahwa proses perpindahan elektron di dalam sistem bukan karena emisi termionik.

Tabel 0.5 Densitas elektron teremisi termionik untuk rancangan sel surya.

				NA= ND = 10 ¹⁹ (cm ⁻³)		NA= ND = 10 ¹⁷ (cm ⁻³)		NA= ND = 10 ¹⁵ (cm ⁻³)	
Material	Tipe	$q\chi$ (eV)	N_c (cm ⁻³)	qV_n (eV)	n_{th} (cm ⁻³)	qV_n (eV)	n_{th} (cm ⁻³)	qV_n (eV)	n_{th} (cm ⁻³)
AlAs	n	3,5	3,67 x 10 ¹⁹	0,033	2,05 x 10 ⁻⁴⁰	0,135	1,38 x 10 ⁻³⁷	0,252	1,26 x 10 ⁻³⁵
	p			6					
InGaP	n	4,07	2,1 x 10 ¹⁹	0,019	5,72 x 10 ⁻⁵⁰	0,124	1,42 x 10 ⁻⁴⁷	0,2436	1,45 x 10 ⁻⁴⁵
	p								
GaSb	n	4,06	2,1 x 10 ¹⁹	-0,04	8,21 x 10 ⁻⁵⁰	0,932	7,34 x 10 ⁻³⁴	0,2121	6,31 x 10 ⁻⁴⁶
	p								
InAs	n	4,9	1,6 x 10 ¹⁸	-0,047	6,73 x 10 ⁻⁶⁴	0,089	3,41 x 10 ⁻⁶³	0,152	3,88 x 10 ⁻⁶²
	p								

Sedangkan probabilitas penerobosan dihitung berdasarkan persamaan:

$$\left(\frac{C}{A} \right)^2 = \left[1 + \frac{(qV_0 \sinh \beta d)^2}{4E(qV_0 - E)} \right]^{-1} \quad (4.16)$$

Dengan asumsi $qV_0 - E$ adalah V_{bi} dan d adalah jarak penerobosan dalam hal ini diasumsikan sebagai lebar deplesi dan $\beta \equiv \sqrt{2m_n(qV_0 - E)/\hbar^2}$ dengan m_n adalah massa efektif elektron (Tabel 4.6). Persamaan ini berlaku jika jarak d sangat kecil,

² S.M. Sze, 2002, *Semiconductor Devices Physics and Technology*, 2nd Ed., John Wiley & Sons, New York.

potensial perintang qV_0 rendah dan massa efektif elektron kecil. Untuk $E=0$, persamaan di atas dapat digantikan dengan persamaan:

$$\left(\frac{C}{A}\right)^2 \sim \exp(-2\beta d) = \exp\left[-2d\sqrt{2m_n(qV_0 - E)/\hbar^2}\right] \quad (4.17)$$

nilai probabilitas dapat dilihat pada Tabel 4.6

Tabel 0.6 Massa efektif elektron dari semikonduktor paduan III-V yang digunakan dalam rancangan sel surya dengan $m_0 = 9,11 \times 10^{-31} \text{ kg}$, adalah massa diam elektron

AlAs	InGaP*	GaSb	InAs
0,1 x m_0	0,084 x m_0	0,042 x m_0	0,027 x m_0

Tabel 0.7 Probabilitas penerobosan pada sambungan heterojunction dari rancangan sel surya.

Material	$N_A=N_D$ (cm^{-3})	V_{bi} (eV)	d (cm)	$\left(\frac{C}{A}\right)^2$
AlAs-InGaP	10^{15}	2,178	$117,41 \times 10^{-4}$	0,931399
InGaP-GaSb		0,4664	$58,96 \times 10^{-4}$	0,983621
GaSb-InAs		0,9879	$90,93 \times 10^{-4}$	0,96361
AlAs-InGaP	10^{17}	1,355	$9,02 \times 10^{-4}$	0,995703
InGaP-GaSb		0,586	$6,6 \times 10^{-4}$	0,99793
GaSb-InAs		1,02	$9,23 \times 10^{-4}$	0,996184
AlAs-InGaP	10^{19}	2,3964	$1,199 \times 10^{-8}$	1
InGaP-GaSb		0,691	$7,176 \times 10^{-9}$	1
GaSb-InAs		1,24	$1,018 \times 10^{-8}$	1

Berdasarkan hasil pada Tabel 4.7 probabilitas terjadinya penerobosan pada sambungan heterojunction sangat tinggi. Probabilitasnya semakin bertambah untuk konsentrasi donor dan akseptor yang semakin tinggi. Hal ini dapat dilihat pada

Gambar 4.1-3 yang menunjukkan adanya akumulasi pembawa muatan pada masing-masing sambungan. Sambungan yang bersifat diskontinu ini merupakan fitur utama dari sel heterojunction yang mana nantinya akan menghasilkan tegangan yang besar. Di samping itu penerobosan merupakan mekanisme yang mungkin untuk mengumpulkan hole melewati puncak diskontinuitas pita. Beberapa penelitian menyatakan bahwa transport pembawa muatan ini dapat terjadi melalui penerobosan bertahap yang terjadi pada puncak diskontinuitas dimana tebal perintangnya sangat tipis, untuk itu diperlukan medan listrik yang cukup besar agar pembawa muatan mencapai daerah puncak diskontinuitas.ⁱⁱⁱ Sedangkan probabilitas penerobosan untuk daerah homojunction dapat dilihat pada Tabel 4.8 berikut.

Tabel 0.8 Probabilitas penerobosan pada sambungan homojunction dari rancangan sel surya.

Material	$N_A=N_D$ (cm^{-3})	V_{bi} (eV)	d (cm)	$\left(\frac{C}{A}\right)^2$
AlAs	10^{15}	1,646	$1,9 \times 10^{-4}$	0,999684
InGaP		1,32729	$1,89 \times 10^{-4}$	0,999879
GaSb		0,2959	$1,03 \times 10^{-4}$	0,999953
InAs		0,0569	$7,43 \times 10^{-4}$	0,999988
AlAs	10^{17}	1,88	$2,05 \times 10^{-5}$	0,999964
InGaP		1,61	$2,05 \times 10^{-5}$	0,999986
GaSb		0,533	$1,35 \times 10^{-5}$	0,999992
InAs		0,27	$9,3 \times 10^{-6}$	0,999997
AlAs	10^{19}	2,08	$2,15 \times 10^{-6}$	0,999996
InGaP		1,82	$2,18 \times 10^{-6}$	0,999998
GaSb		0,8	$1,67 \times 10^{-6}$	0,999999
InAs		0,46	$1,22 \times 10^{-6}$	0,999999

Dari Tabel 4.8 tersebut terlihat bahwa tanpa adanya medan listrik, probabilitas penerobosan untuk semua sambungan p-n semikonduktor sejenis juga tinggi dengan probabilitas semakin besar untuk konsentrasi akseptor dan donor yang semakin tinggi. Hal ini dapat dijelaskan karena meningkatnya probabilitas disebabkan oleh

semakin kecilnya lebar deplesi sehingga elektron dapat dengan mudah menerobos. Dalam hal ini dapat dikatakan bahwa untuk konsentrasi akseptor dan donor yang tinggi, sambungan p-n pada solar sel bersifat sebagaimana *tunnel junction* (TJ). Pada TJ sering terjadi ketidakstabilan arus^{iv} dan menyebabkan loss pada sel surya terutama pada material InGaP^{vvi}. Untuk itu perlu dilakukan perhitungan dengan adanya medan listrik (E).

4.4 Perbandingan Medan Listrik

Ketika cahaya matahari mengenai permukaan sel surya, akan terdapat elektron di lapisan tipe-n. Kemudian, elektron tersebut bereksitasi ke lapisan tipe-p dan meninggalkan hole di lapisan sebelumnya. Hal tersebut yang akan menciptakan medan listrik di dalamnya (P_N Junctions and Band Gaps.html, 2016). Melalui persamaan Maxwell pada persamaan (2.6), dengan menggunakan penyelesaian sistem persamaan linear orde kedua seperti yang ditampilkan dalam Lampiran, persamaan (2.6) kemudian menjadi

$$E = C_1 e^{\sqrt{\mu_r \cdot k_0^2 (\epsilon_r - \frac{\sigma}{\omega \epsilon_0})} z} + C_2 e^{-\sqrt{\mu_r \cdot k_0^2 (\epsilon_r - \frac{\sigma}{\omega \epsilon_0})} z} \quad (4.18)$$

Dimana C_1 dan C_2 merupakan konstanta yang didapatkan dengan memasukkan parameter- parameter terkait dan syarat batas dimensi sel surya terlebih dahulu, ϵ_0 untuk nilai permitivitas di udara ($8,85 \times 10^{-12}$ F/m), μ_r adalah permeabilitas listrik pada suatu bahan, k_0 adalah konstanta Boltzmann ($1,38 \times 10^{-23}$ m² kg s⁻² K⁻¹), σ adalah rapat muatan, ϵ_r adalah permitivitas relatif suatu bahan dan E adalah nilai medan listrik dari penjalaran gelombang yang akan dianalisa. Sementara z adalah lebar deplesi pada lapisan masing-masing sel yang diperoleh melalui persamaan:

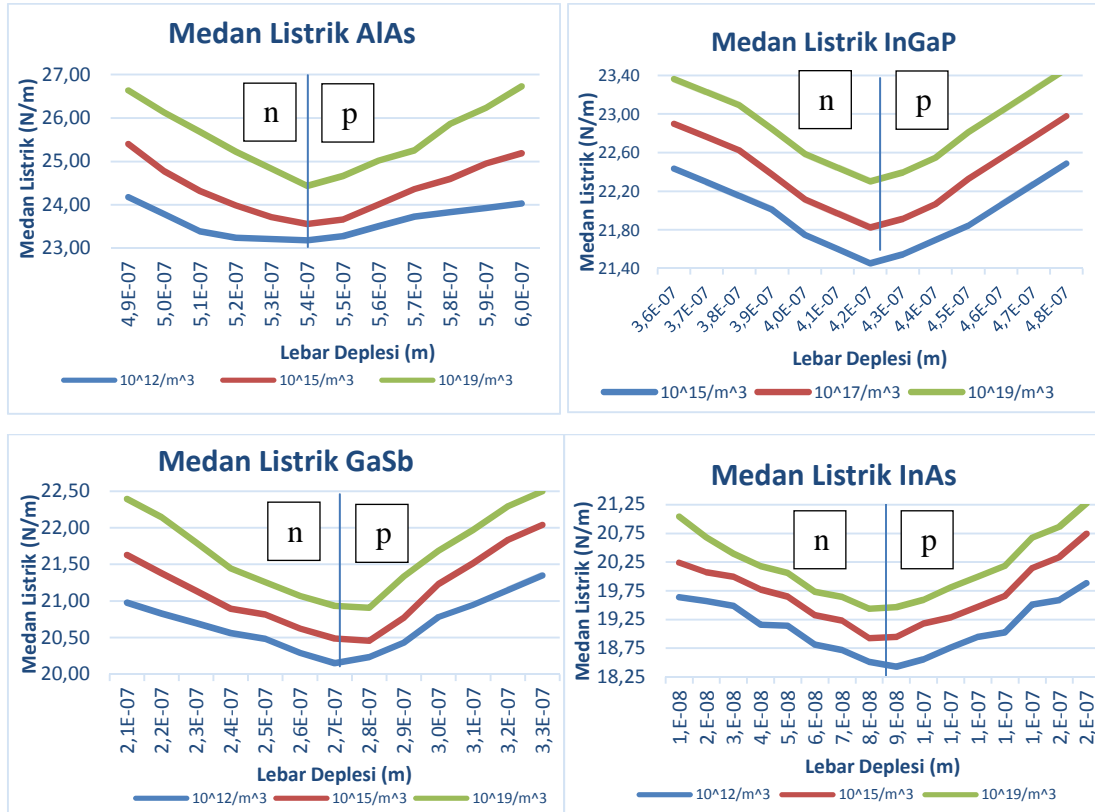
$$z = \sqrt{\frac{2\epsilon_r}{q} \left[\frac{kT}{q} \ln \left(\frac{N_A N_D}{n_i^2} \right) \right] \frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D}} \quad (4.19)$$

dimana N_A adalah konsentrasi akseptor pada lapisan tipe-p dan N_D adalah konsentrasi donor pada lapisan tipe-n. T adalah suhu 300 K (Sze, 1985).

Perilaku perambatan gelombang listrik yang dihasilkan pada permukaan sel surya berkaitan dengan panjang gelombang yang dapat diserap melalui hubungan medan EM dengan persamaan (Rana, 2011)

$$\bar{E} = |\bar{E}_0| \exp j(\omega t \pm kx \pm \beta) \quad (4.20)$$

dengan $k = \frac{2\pi}{\lambda}$, yang menunjukkan bahwa semakin besar penjaralan gelombang listrik di dalam suatu medium, sel surya tersebut mampu menyerap panjang gelombang dari cahaya matahari dengan rentang yang lebih lebar. Hal ini membuktikan korelasi antara energi gap (E_g) terhadap panjang gelombang. Grafik medan listrik terhadap lebar deplesi sel ditunjukkan oleh Gambar 4.6 berikut.



Gambar 4.6 Medan listrik terhadap lebar deplesi sel surya

Dari Gambar 4.6 diketahui bahwa lebar deplesi yang semakin bertambah besar akan menghasilkan nilai medan listrik yang semakin besar. Perbedaan nilai konsentrasi donor (N_D) dan konsentrasi akseptor (N_A) juga berpengaruh terhadap besar medan listrik yang dihasilkan. Semakin tinggi konsentrasi donor yang diberikan, perbedaan tingkat energi akan makin kecil ($E_C - E_F$) sehingga muatan elektron-hole makin mudah untuk bereksitasi sehingga mempengaruhi besar medan listriknya (Sze,1985).

Hasil pada Gambar 4.6 dibandingkan dengan pendekatan teoretis berdasarkan persamaan berikut:

$$\varepsilon(x) = -\frac{qN_A(x+x_p)}{\varepsilon_s} \text{ untuk } -x_p \leq x < 0 \quad (4.21)$$

$$\varepsilon(x) = -\varepsilon_{\max} + \frac{qN_D x}{\varepsilon_s} = \frac{qN_D}{\varepsilon_s}(x-x_n) \text{ untuk } 0 < x \leq x_n \quad (4.22)$$

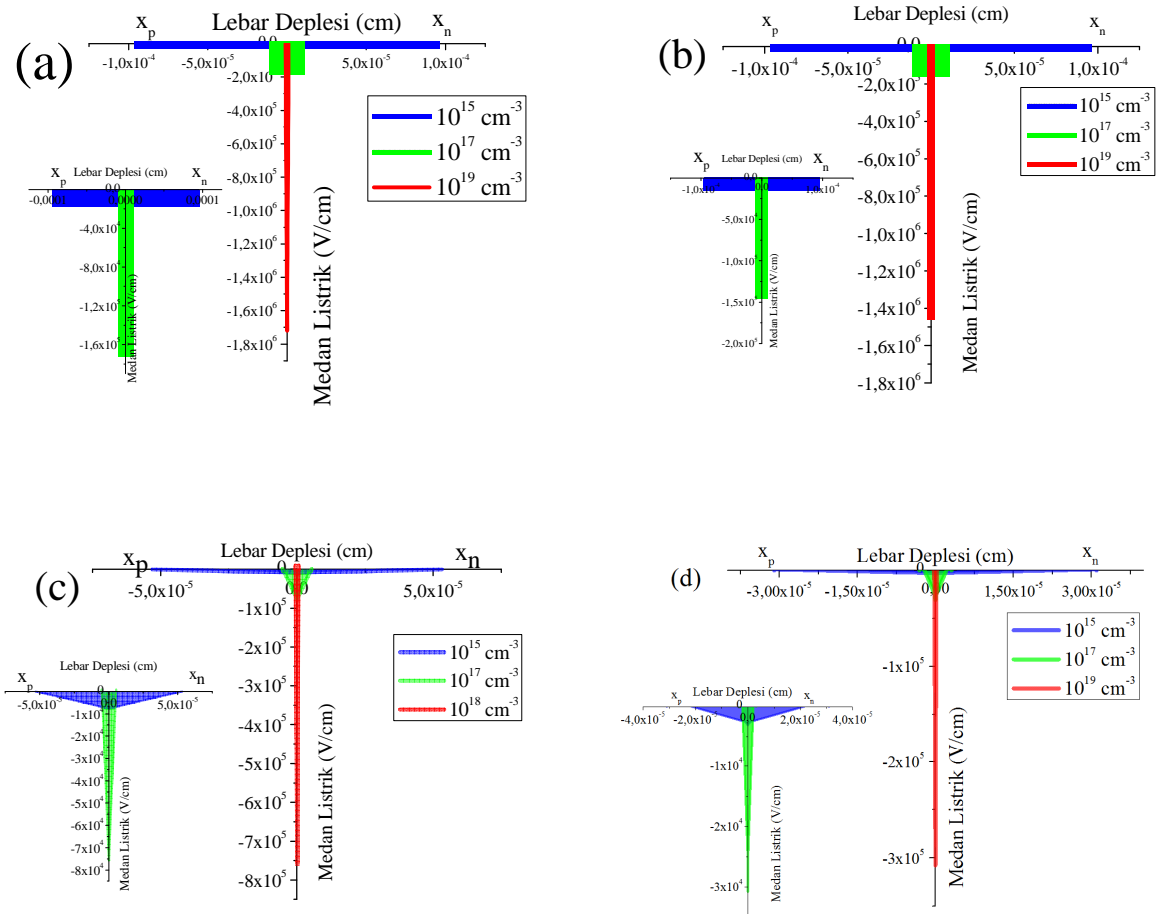
$$\varepsilon_{\max} = \frac{qN_D x_n}{\varepsilon_s} = \frac{qN_A x_p}{\varepsilon_s} \quad (4.23)$$

x_p dan x_n merupakan lebar deplesi di daerah p dan n, ditentukan melalui persamaan:

$$x_p = \sqrt{\frac{2\varepsilon_s V_{bi}}{q} \frac{N_D}{N_A(N_A + N_D)}} \quad (4.24)$$

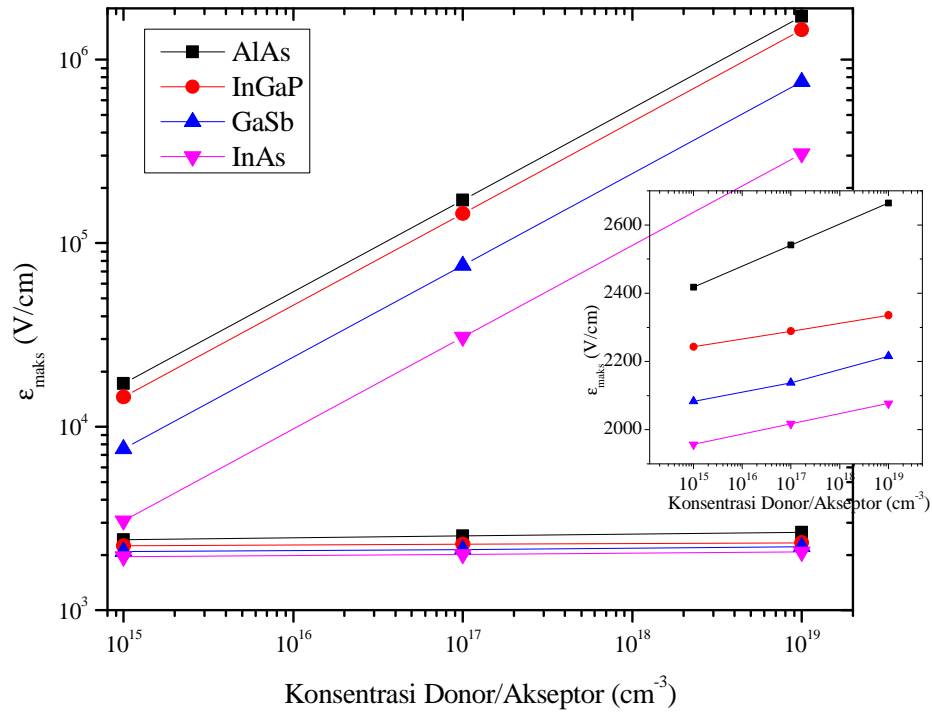
$$x_n = \sqrt{\frac{2\varepsilon_s V_{bi}}{q} \frac{N_A}{N_D(N_A + N_D)}} \quad (4.25)$$

V_{bi} diperoleh dari Tabel. 4.2 Hasil perhitungan dapat dilihat pada Gambar. 4.7.



Gambar 4.7 Distribusi medan listrik pada sambungan p-n *homojunction*. Daerah di bawah kurva merupakan V_{bi} .

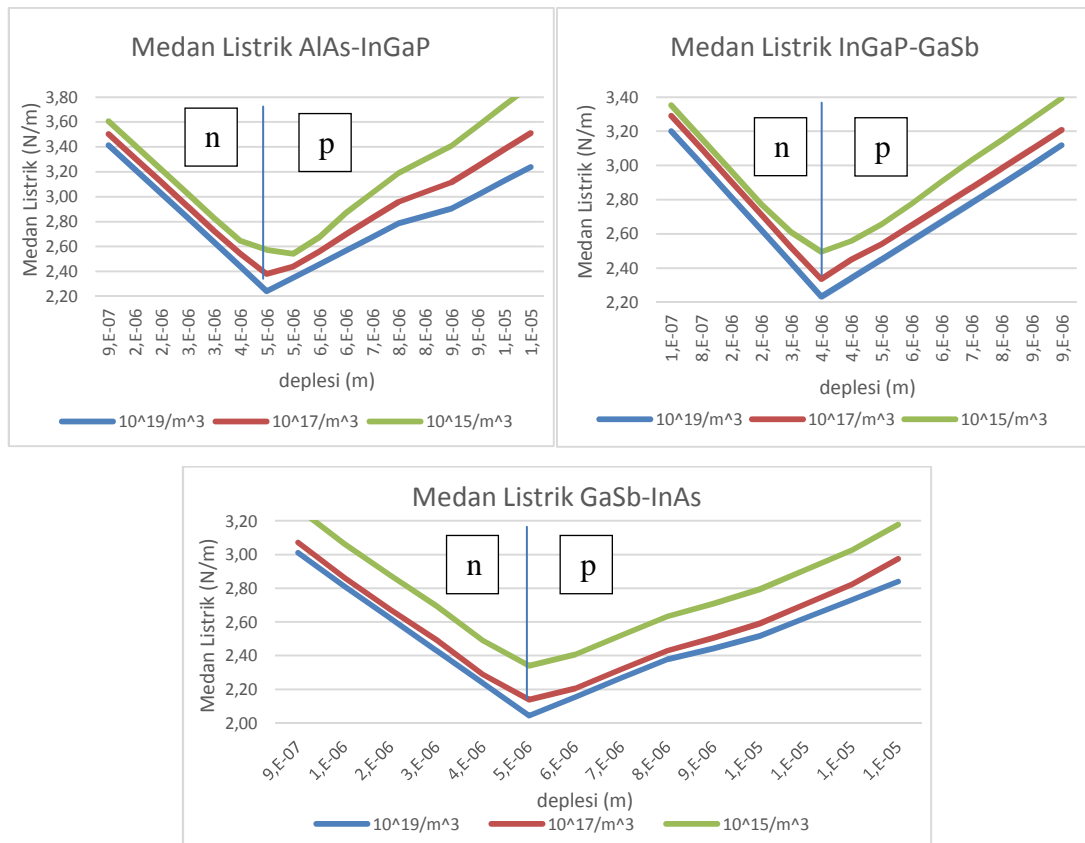
Medan listrik maksimum pada Gambar 4.6 jika dibandingkan dengan medan listrik maksimum pada Gambar 4.7 akan diperoleh hasil sebagai berikut.



Gambar 4.8 Perbandingan medan listrik maksimum yang dihasilkan oleh sambungan p-n homojunction melalui persamaan (4.18) dan (4.23).

Dari Gambar 4.8 terlihat bahwa hasil perhitungan melalui persamaan (4.18) menghasilkan medan listrik yang jauh lebih kecil daripada hasil perhitungan secara teoretis (persamaan (4.23)) dengan nilai 1-3 orde lebih kecil. Persamaan (4.18) tidak memperhitungkan distribusi pembawa muatan hanya merupakan pendekatan secara makroskopik. Namun demikian, secara umum, kecenderungan kurva keduanya sama, yaitu konsentrasi donor/akseptor yang besar akan menyebabkan medan listrik maksimum yang dihasilkan juga besar dan nilai tertinggi diperoleh dari semikonduktor AlAs.

Sementara grafik medan listrik terhadap sambungan *heterojunction* sel surya ditunjukkan melalui Gambar 4.9 berikut ini.



Gambar 4. 9 Medan listrik terhadap lebar deplesi sel surya sambungan *heterojunction*

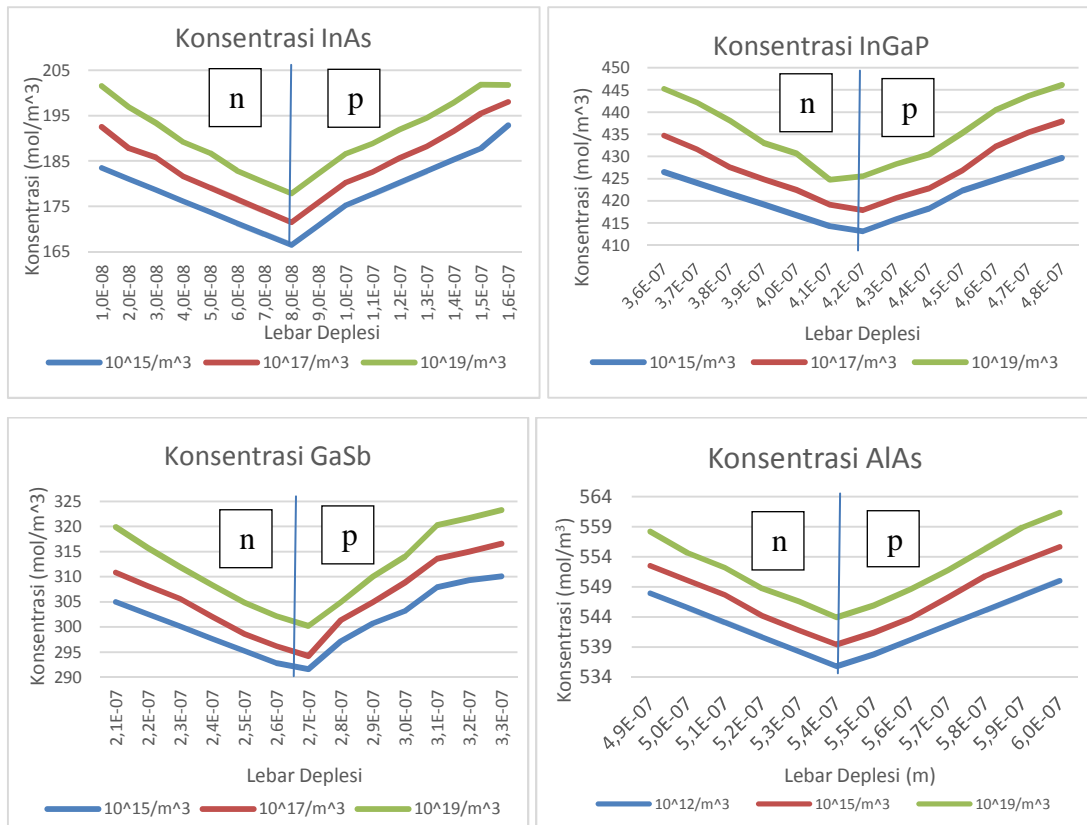
Dari Gambar 4.9 dapat dilihat bahwa medan listrik pada sambungan *heterojunction* memiliki nilai yang asimetris jika dibandingkan dengan Gambar 4.6. Hal ini dikarenakan lebar deplesi pada sambungan *heterojunction* memiliki tipe-n dan tipe-p tidak sama, sebagai konsekuensi dari perbedaan permitivitas semikonduktor (persamaan (4.7)).

4.5 Perbandingan Densitas Pembawa Muatan

Selain medan listrik, melalui simulasi analitis ini juga akan didapatkan besaran densitas pembawa muatan dengan menggunakan persamaan (2.14). Dengan mendapatkan besaran konsentrasi hole- elektron, dapat ditentukan nilai arus yang dihasilkan sel surya (untuk 1 A yang dihasilkan= $1,6 \times 10^{19}$ elektron). Arus keluaran sel surya inilah yang akan mempengaruhi nilai efisiensinya. Dengan menggunakan metode pemisahan variabel dari persamaan pada Lampiran, didapatkan persamaan untuk mencari nilai konsentrasi pada tiap lapisannya, yaitu

$$C = \left[\cos \frac{n\pi}{L} z + \frac{L}{n\pi} \sin \frac{n\pi}{L} z \right] \frac{4}{n\pi} \sin \frac{n\pi}{L} z + \frac{R_i}{2d_i} z^2 \quad (4.26)$$

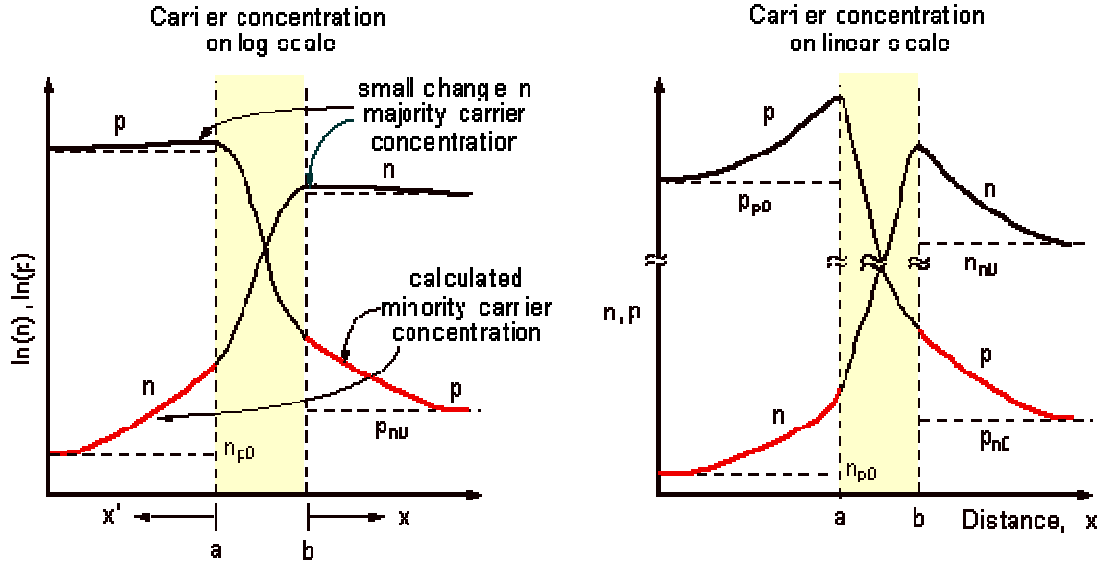
dengan, L adalah total tebal pada sel surya, n adalah bilangan integer, z merupakan lebar deplesi tiap sel dan R merupakan konstanta gas yaitu 8,314 J/mol K, d???. Kemudian, konsentrasi pembawa muatan (C) ini yang kemudian akan digunakan untuk mencari rapat arus sel surya. Persamaan (4.26) fungsi perubahan konsentrasi sel surya terhadap lebar deplesinya.



Gambar 4.10 Konsentrasi pembawa muatan terhadap lebar deplesi sel surya

Bagian kiri Gambar 4.10 adalah lapisan tipe-n yang memiliki nilai N_D dengan elektron yang menjadi muatan mayoritasnya dan bagian kanan merupakan grafik dari lapisan tipe-p yang memiliki nilai N_A dengan hole yang menjadi muatan mayoritasnya. Konsentrasi pembawa muatan sel surya terbesar terdapat di dalam lapisan AlAs dengan nilai konsentrasi donor dan akseptor yaitu sebesar $10^{19}/cm^3$, hal ini karena AlAs memiliki lebar deplesi yang terbesar jika dibandingkan dengan lapisan lainnya.

Menurut (Sze, 1985), jika asumsi *abrupt junction* digunakan, maka di dalam lebar deplesi hanya terjadi perubahan konsentrasi pembawa muatan secara drastis tepat pada $x=0$.



Pada keadaan kesetimbangan termal, densitas pembawa muatan mayoritas di dalam daerah netral pada dasarnya sama dengan konsentrasi pengotor. Notasi n dan p menunjukkan tipe semikonduktor dan o adalah keadaan kesetimbangan termal. Dengan demikian n_{no} dan n_{po} adalah densitas elektron setimbang pada sisi n dan p . Sehingga persamaan (4.4) dapat dituliskan sebagai:

$$V_{bi} = \frac{kT}{q} \ln \frac{p_{po} n_{no}}{n_i^2} = \frac{kT}{q} \ln \frac{n_{no}}{n_{po}} \quad (4.27)$$

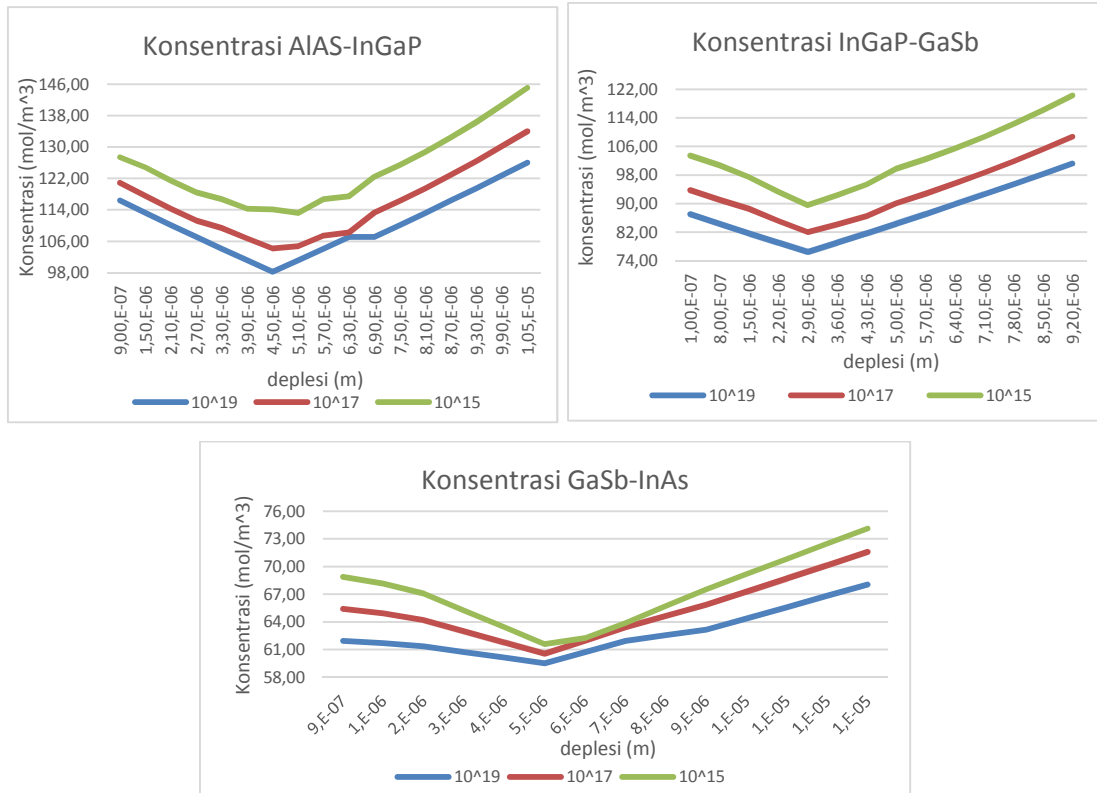
dengan $p_{po} n_{po} = n_i^2$ sehingga persamaan (4.27) dapat disusun ulang menjadi:

$$n_{no} = n_{po} \exp\left(\frac{qV_{bi}}{kT}\right) \text{ dan } p_{po} = p_{no} \exp\left(\frac{qV_{bi}}{kT}\right) \quad (4.28)$$

$$p(x) = \left[p_{no} \left(\exp\left(\frac{qV}{kT} - 1\right) \exp\left(\frac{-x}{L_p}\right) \right) \right] + p_{no} \quad (4.29)$$

dan sebaliknya untuk $n(x)$, $L_p = \sqrt{D_p \tau_p}$ dan $L_n = \sqrt{D_n \tau_n}$ yaitu panjang difusi pembawa muatan minoritas dari Tabel 3.1.

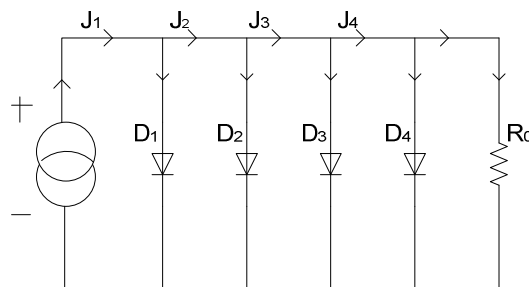
Untuk nilai konsentrasi terhadap sambungan *heterojunction* sel surya ditunjukkan melalui Gambar 4.9 berikut ini.



Gambar 4.11 Konsentrasi pembawa muatan terhadap depleksi sambungan heterojunction

4.6 Perbandingan Rapat Arus Keluaran Sambungan *Homojunction*

Dengan menggabungkan medan listrik dan konsentrasi yang terdapat di dalam sel surya semikonduktor III-V ke persamaan (2.10), akan didapatkan rapat arus yang dihasilkan oleh sel surya tersebut. Dalam penelitian ini, rangkaian sel surya *multijunction* ditunjukkan dalam Gambar 4.10 dimana lapisan tiap sel digambarkan dalam bentuk dioda 1 (lapisan AlAs), dioda 2 (lapisan InGaP), dioda 3 (lapisan GaSb) dan dioda 4 (lapisan InAs) yang disusun secara paralel dengan rapat arus yang terbagi-bagi dari sumber tegangan, menuju dioda 1, dioda 2, dioda 3 dan dioda 4.



Gambar 4.12 Skema rangkaian sel surya *multijunction*

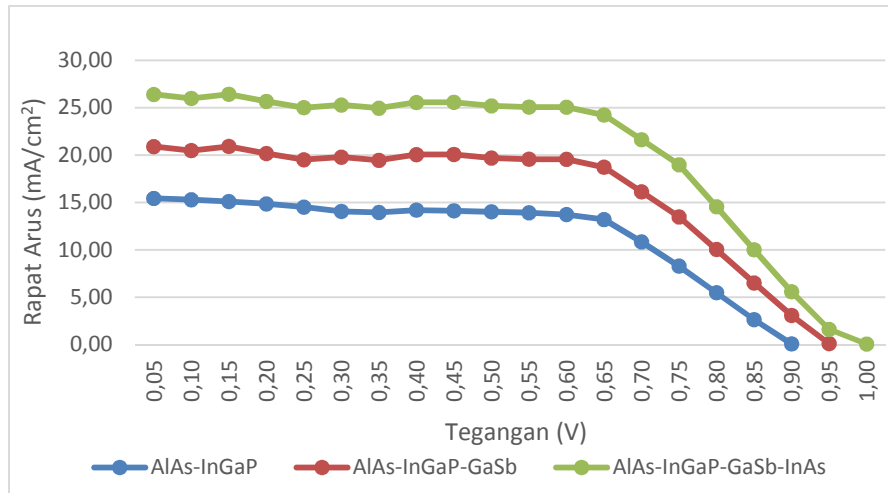
Dari rangkaian Gambar 4.10, dapat diketahui bahwa nilai R_s dan R_{SH} diabaikan. Hal ini karena sel surya yang dipasang pada suhu kamar memiliki nilai R_s dan R_{SH} yang sangat kecil sehingga dapat diabaikan. Arus yang dihasilkan pada suatu sel surya sangat berkaitan dengan efisiensi yang terkandung di dalam sel surya tersebut. Semakin tinggi arus yang dapat dihasilkan oleh sel surya, maka sel surya tersebut memiliki nilai efisiensi yang tinggi. Arus yang dihasilkan oleh sel surya sebanding dengan besar rapat arus yang dihasilkan dikali dengan luas permukaan sel surya tersebut. Dalam hal ini, besar rapat jenis arus yang dihasilkan memiliki persamaan (Neudeck, 1989)

$$J = J_s - J_0 \left[\exp \frac{eV}{kT} - 1 \right] \quad (4.30)$$

Persamaan rapat jenis arus diatas berlaku pada keadaan *single junction*. Sementara untuk keadaan *multi junction*, persamaan (4.21) berubah menjadi

$$J = (J_{s1} - J_{01} \left[\exp \frac{eV}{kT} - 1 \right]) + (J_{s2} - J_{02} \left[\exp \frac{eV}{kT} - 1 \right]) + (J_{s3} - J_{03} \left[\exp \frac{eV}{kT} - 1 \right]) + (J_{s4} - J_{04} \left[\exp \frac{eV}{kT} - 1 \right]) \quad (4.31)$$

dimana k merupakan konstanta boltzmann ($1,38 \times 10^{-23} \text{ m}^2 \text{ kg s}^{-2} \text{ K}^{-1}$), T merupakan suhu yang dibuat konstan yaitu 300 K, J_s adalah rapat arus pada sumber yang didapat dari persamaaan (2.10). Nilai untuk masing-masing J_s dari persamaan (2.10) pada lapisan sel surya adalah $J_s \text{ AlAs} = 1,3 \text{ mA/cm}^2$, $J_s \text{ InGaP} = 0,9 \text{ mA/cm}^2$, $J_s \text{ GaSb} = 0,6 \text{ mA/cm}^2$ dan $J_s \text{ InAs} = 0,3 \text{ mA/cm}^2$. Sedangkan J_0 merupakan rapat arus pada kondisi sel surya tidak terkena cahaya matahari dimana masing-masing nilai dari J_0 $\text{AlAs} = 1 \text{ mA/cm}^2$, $J_0 \text{ InGaP} = 0,7 \text{ mA/cm}^2$ (Connolly, 2016), $J_0 \text{ GaSb} = 0,3 \text{ mA/cm}^2$ dan $J_0 \text{ InAs} = 0,1 \text{ mA/cm}^2$ (Juno, 2015).

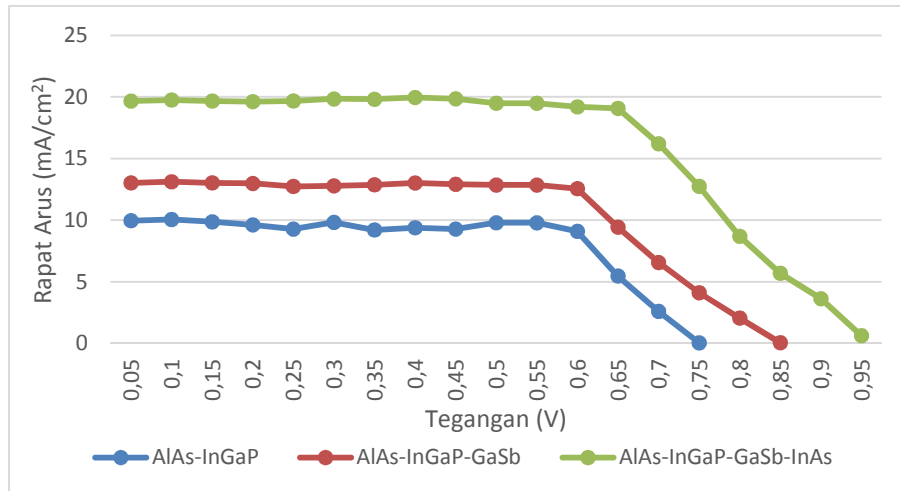


Gambar 4.13 Rapat arus sel surya dengan N_A dan $N_D = 10^{19}/\text{cm}^3$

Dari Gambar 4.11, dapat dilihat perbandingan rapat arus untuk masing-masing sel surya *double junction*, *triple junction* dan *multi junction* dengan konsentrasi donor dan akseptor sebesar $10^{19}/\text{cm}^3$. Pada sel surya *multi junction*, memiliki nilai rapat arus terbesar dibandingkan dengan sel surya lainnya dimana pada sel surya *multi junction* memiliki nilai rapat arus sebesar $25 \text{ mA}/\text{cm}^2$. Namun pada tegangan 0,95 V, grafik sel surya *multijunction* berimpit dengan sel surya *triple junction*. Hal ini dikarenakan besarnya nilai konsentrasi donor dan akseptor yang diterapkan sehingga mempengaruhi nilai arus keluaran pada sel surya tersebut. Pada umumnya, rapat arus pada sel surya berbahan semikonduktor golongan III-V memiliki nilai berkisar antara $20\text{-}30 \text{ mA}/\text{cm}^2$ (Green, 2015). Semakin bervariasi lapisan pada sel surya, maka makin banyak cahaya matahari yang mampu diserap yang kemudian akan dikonversikan menjadi arus listrik. Dari persamaan (3.2) juga dapat ditentukan nilai V_{MPP} yaitu untuk sel surya *multijunction* sebesar 0,6 V; sel surya *triple junction* sebesar 0,56 V dan sel surya *double junction* yaitu sebesar 0,51 V.

Untuk menentukan nilai V_{MPP} , terlebih dahulu dicari nilai V_{OC} dengan menggunakan persamaan (3.3) yaitu untuk sel surya *multijunction* sebesar 0,9 V; sel surya *triple junction* sebesar 0,95 V dan sel surya *double junction* yaitu sebesar 1 V.

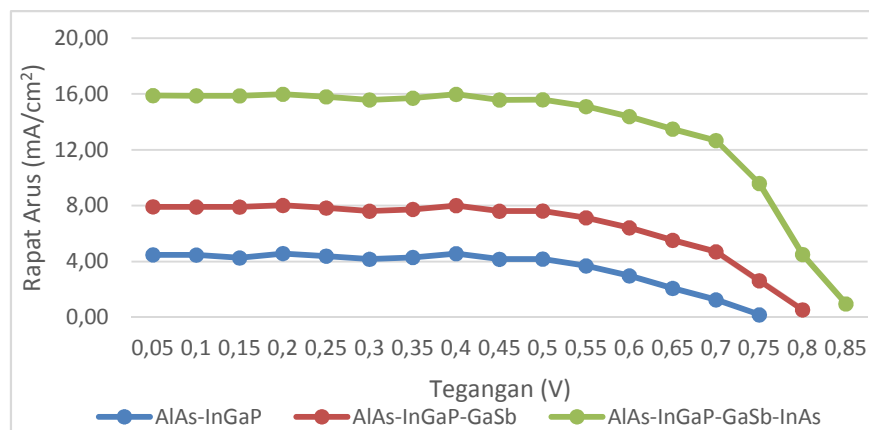
Sementara pada sel surya dengan konsentrasi donor dan konsentrasi akseptor sebesar $10^{17}/\text{cm}^3$, grafik rapat arus terhadap tegangan ditunjukkan melalui Gambar 4.9.



Gambar 4.14 Rapat arus sel surya dengan N_A dan $N_D = 10^{15}/\text{cm}^3$

Pada Gambar 4.12, dapat terlihat grafik rapat arus dengan nilai konsentrasi donor dan akseptor masing-masing sebesar $10^{15}/\text{cm}^3$. Sel surya *multijunction* masih memiliki rapat arus terbesar dibanding dengan sel surya yang lainnya. Hal tersebut dapat dilihat seperti pada persamaan (4.22) dimana pada sel surya *double junction* hanya memiliki dua j_s sedangkan sel surya *multijunction* memiliki empat j_s . Namun, besar rapat arus yang dihasilkan dari konsentrasi donor dan akseptor sebesar $10^{15}/\text{cm}^3$ memiliki nilai yang lebih rendah dibandingkan dengan besar rapat arus yang dihasilkan dari konsentrasi donor dan akseptor sebesar $10^{19}/\text{cm}^3$. Hal tersebut dikarenakan dengan penambahan donor/akseptor, akan menambah satu tingkat energi baru di bawah pita konduksi/valensi. Jumlah konsentrasi donor/akseptor yang diberikan, dapat meningkatkan efek konduktivitas.

Sementara untuk rapat arus pada saat sel diberi konsentrasi donor dan akseptor masing-masing sebesar $10^{15}/\text{cm}^3$, dapat dilihat melalui Gambar 4.13



Gambar 4.15 Rapat arus sel surya dengan N_A dan $N_D = 10^{15}/\text{cm}^3$

Dari persamaan (3.3), dapat ditentukan nilai V_{MPP} untuk AlAs-InGaP sebesar 0,5 V; untuk AlAs-InGaP-GaSb sebesar 0,46 V dan untuk AlAs-InGaP-GaSb-InAs sebesar 0,43 V. Sementara untuk V_{OC} , AlAs-InGaP memiliki nilai sebesar 0,75 V; AlAs-InGaP-GaSb sebesar 0,8 V dan AlAs-InGaP-GaSb-InAs sebesar 0,85 V.

Secara teoritis kurva dioda pada sambungan *homojunction* juga dapat dihitung menggunakan persamaan (4.32) berikut :

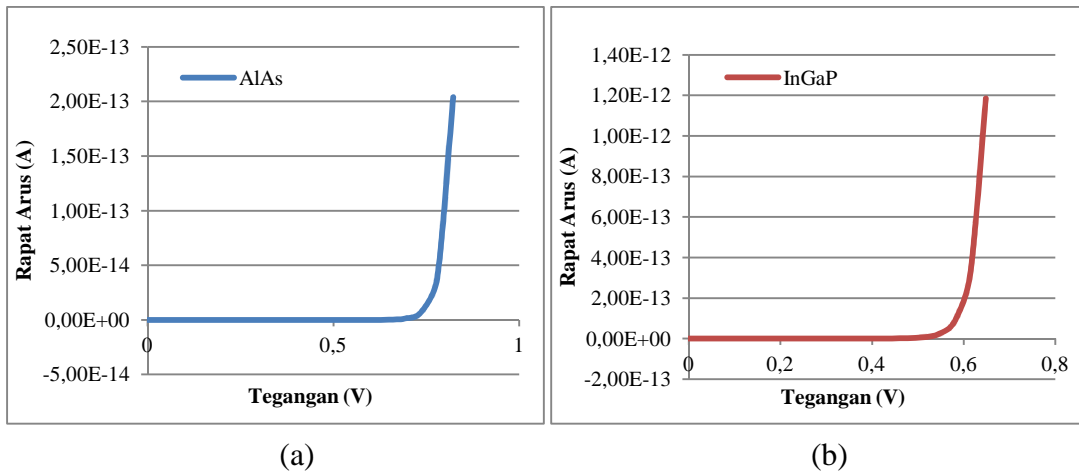
$$I = J_s \left[\exp\left(\frac{V}{nKT}\right) - 1 \right] - I_p \quad (4.32)$$

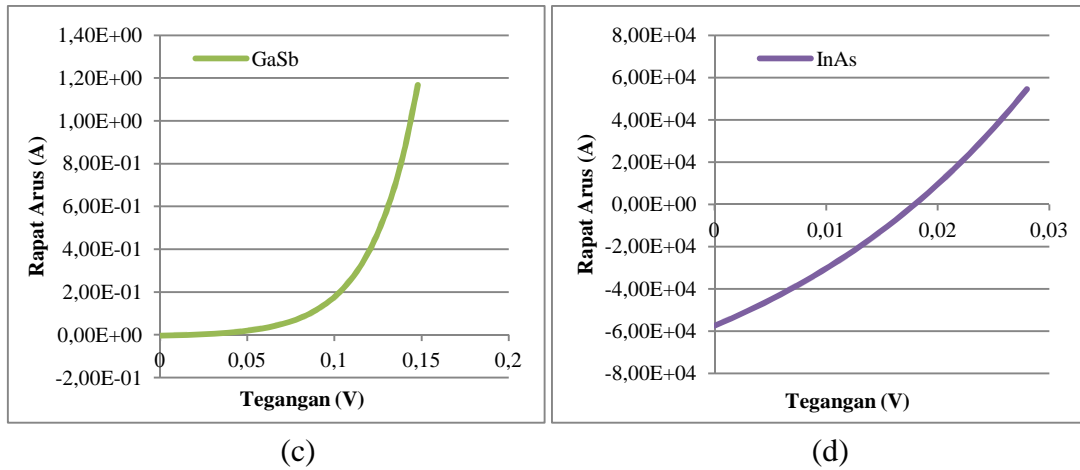
dengan

$$I_s = q.A \left[\frac{L_n n_{po}}{\tau_n} + \frac{L_p p_{no}}{\tau_p} \right] \quad (4.33)$$

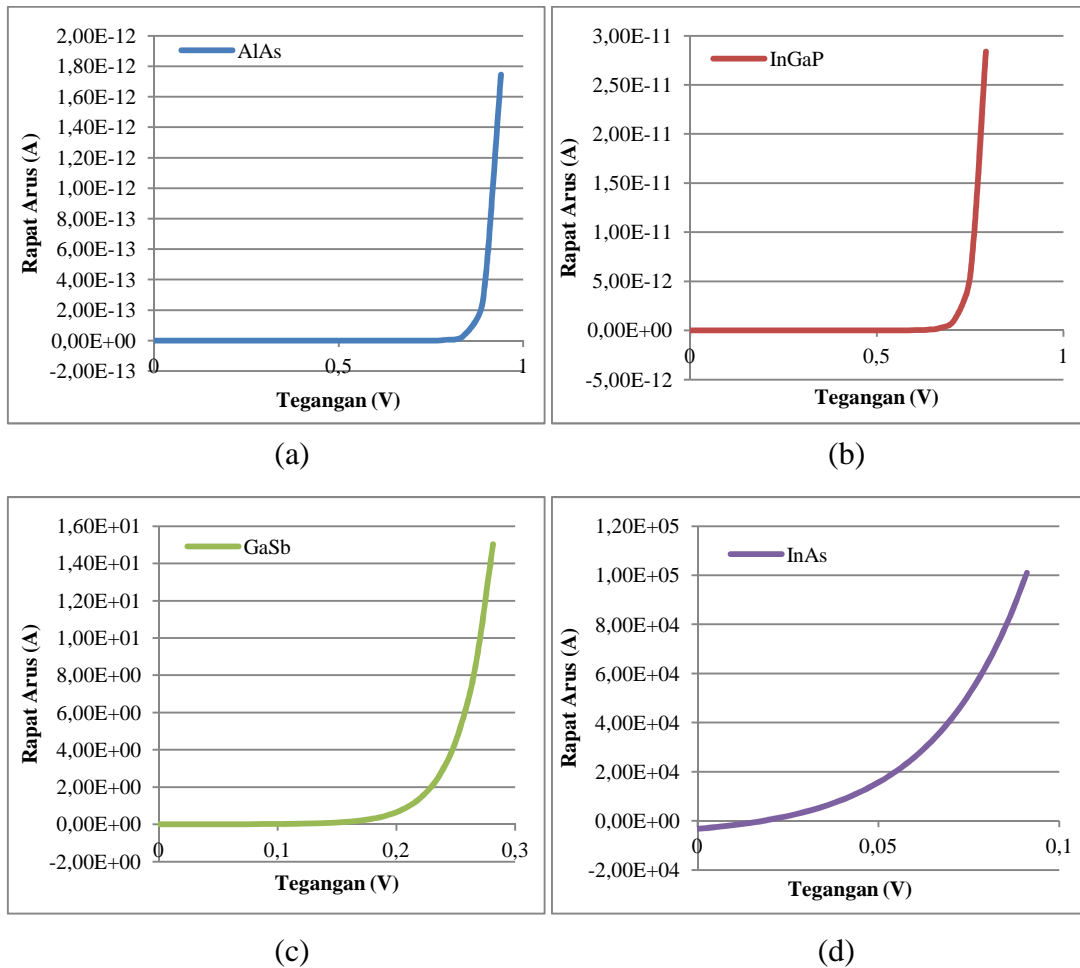
$$I_p = I(\lambda) = I_o e^{-\alpha \lambda} \quad (4.34)$$

Dari persamaan (4.32), didapatkan nilai I_s untuk masing-masing sambungan n-p sejenis. Nilai arus (I_s) yang dihasilkan untuk material AlAs dan InGaP sangatlah kecil berada pada rentang 10^{-23} hingga 10^{-28} A. Hal ini dikarenakan nilai arus (I_s) yang dihasilkan bergantung pada nilai konsentrasi pembawa muatan intrinsik (ni). Konsentrasi pembawa muatan intrinsik (ni) untuk material AlAs sebesar $15,74 \text{ cm}^{-3}$ dan untuk material InGaP sebesar $3,085.10^3 \text{ cm}^{-3}$. Kedua nilai tersebut sangatlah kecil jika dibandingkan dengan nilai konsentrasi pembawa muatan intrinsik (ni) untuk GaSb yaitu sebesar $3,317.10^{12} \text{ cm}^{-3}$ dan InAs sebesar $2,971.10^{15} \text{ cm}^{-3}$. Berikut merupakan gambar hasil perhitungan nilai I terhadap V dengan variasi konsentrasi doping.

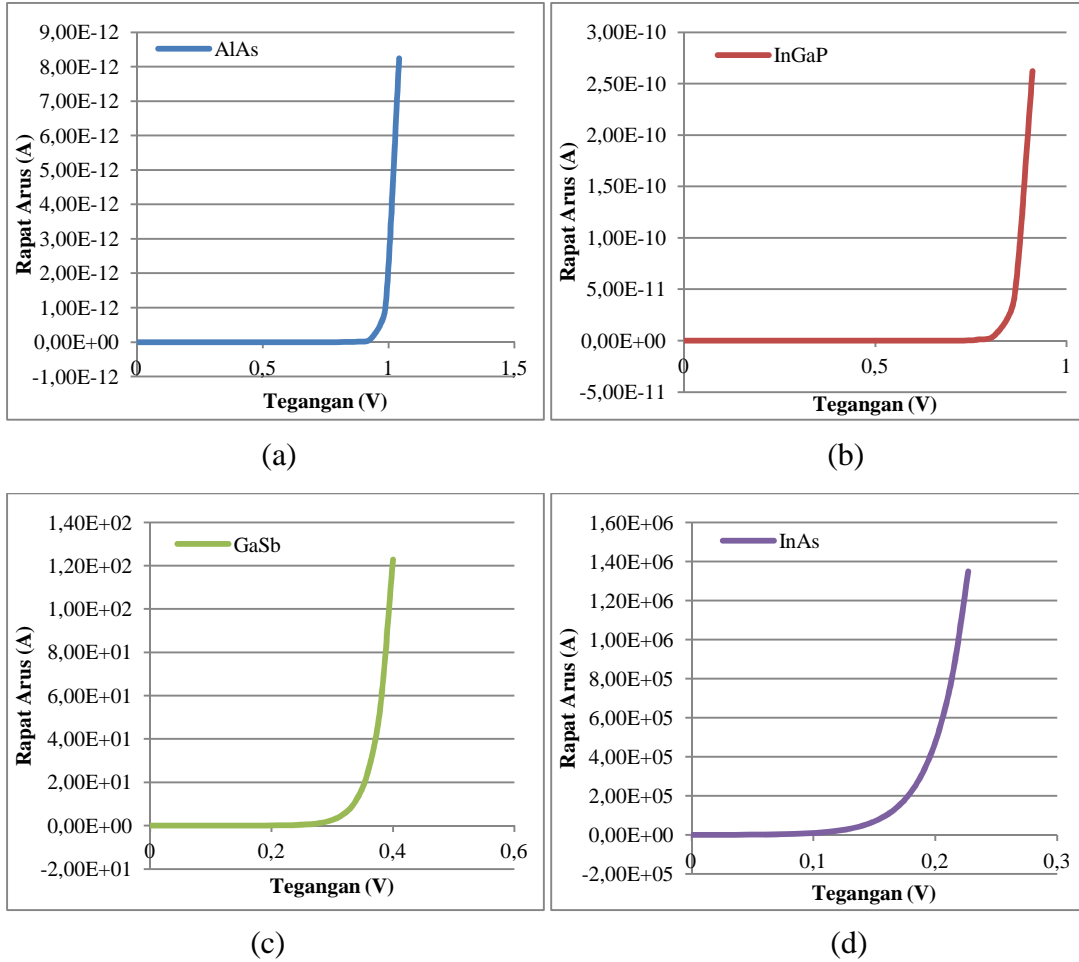




Gambar 4.16 Grafik hubungan tegangan dengan rapat arus yang dihasilkan oleh sambungan n-p homojunction pada konsentrasi doping 10^{15} cm^{-3} melalui persamaan (4.32).



Gambar 4.17 Grafik hubungan tegangan dengan rapat arus yang dihasilkan oleh sambungan n-p homojunction pada konsentrasi doping 10^{17} cm^{-3} melalui persamaan (4.32).



Gambar 4.18 Grafik hubungan tegangan dengan rapat arus yang dihasilkan oleh sambungan n-p homojunction pada konsentrasi doping 10^{19} cm^{-3} melalui persamaan (4.32).

Dari gambar 4.16, 4.17, dan 4.18 terlihat bahwa penambahan konsentrasi doping mengakibatkan turunnya nilai rapat arus (I_s) pada sambungan *homojunction*.

4.7 Perbandingan Efisiensi Sel Surya

Setelah dilakukan perhitungan terhadap rapat arus di dalam masing-masing sel surya, kemudian dilakukan perhitungan untuk mendapatkan efisiensi sel surya pada bahan semikonduktor ekstrinsik dengan menggunakan persamaan (3.1) (Rana, 2011). Dimana N_{ph} merupakan jumlah foton di dalam spektrum matahari, ε_{av} untuk energi rata-rata pada tiap foton. Dalam keadaan dimana cahaya matahari memancar pada siang hari, memiliki jumlah foton sebanyak $4.3 \times 10^{17} \text{ /sec.cm}^2$ dengan energi rata-ratanya 2.78eV (Smith, 2007). Sedangkan J_s adalah rata-rata rapat arus (A/cm^2) di dalam sel surya yang telah dihitung terlebih dahulu dan untuk V_{mp} dapat

ditentukan dengan menggunakan persamaan (3.2) serta untuk mendapatkan nilai V_{OC} terlebih dahulu menggunakan persamaan (3.3).

Dari persamaan (3.1), kemudian dibentuk tabel nilai efisiensi tertinggi yang dapat dicapai oleh masing-masing sel surya seperti yang ditunjukkan oleh Tabel 4.9.

Tabel 0.9 Efisiensi sel surya *double*, *triple* dan *multi junction* pada konsentrasi $10^{19}/\text{cm}^3$

AlAs-InGaP	AlAs-InGaP-GaSb	AlAs-InGaP-GaSb-InAs
14,3 %	29,3 %	35,3 %

Pada saat diberi konsentrasi donor dan akseptor $10^{19}/\text{cm}^3$, sel surya *multi junction* menghasilkan nilai efisiensi terbesarnya yaitu 35,3%. Sel surya *multi junction* golongan III-V memiliki nilai efisiensi yang terbesar dibandingkan dengan yang lainnya. Hal ini karena makin bervariasi bandgap yang dimiliki pada setiap lapisannya sehingga mampu menyerap panjang gelombang dari sinar matahari dengan rentang yang lebih lebar dan mengkonversikannya menjadi energi listrik yang dapat digunakan untuk kegiatan sehari-hari.

Sementara untuk nilai efisiensi dengan menggunakan konsentrasi donor dan akseptor masing-masing $10^{17}/\text{cm}^3$, dapat dilihat melalui Tabel 4.10

Tabel 0.10 Efisiensi sel surya *double*, *triple* dan *multi junction* pada konsentrasi $10^{17}/\text{cm}^3$

AlAs-InGaP	AlAs-InGaP-GaSb	AlAs-InGaP-GaSb-InAs
12,6 %	18,9 %	28,4 %

Berbeda dengan Tabel 4.9, pada Tabel 4.10 dimana nilai efisiensi yang dihasilkan pada sel surya dengan konsentrasi donor dan akseptor masing-masing $10^{17}/\text{cm}^3$, memiliki nilai efisiensi yang relatif lebih rendah. Hal ini karena pemberian konsentrasi donor dan akseptor akan berpengaruh terhadap penurunan nilai arus (J_s) dan V_{MPP} yang dihasilkan seperti pada persamaan (3.1) yang kemudian juga akan mempengaruhi efisiensi yang mampu dihasilkan oleh sel surya.

Pada nilai efisiensi saat sel surya diberi konsentrasi $10^{15}/\text{cm}^3$, dapat dilihat melalui Tabel 4.11 berikut

Tabel 0.11 Efisiensi sel surya *double*, *triple* dan *multi junction* pada konsentrasi $10^{15}/\text{cm}^3$

AlAs-InGaP	AlAs-InGaP-GaSb	AlAs-InGaP-GaSb-InAs
11,7 %	14,6 %	19,1 %

Untuk lapisan paling atas, yaitu AlAs dengan bandgap sebesar 2,15 eV dapat menyerap rentang spektrum UV. Sementara lapisan yang paling bawah yaitu InAs dengan nilai bandgap 0,36 eV mampu menyerap sinar matahari hingga rentang NIR. Rentang spektrum yang lebar yang mampu diserap inilah yang mempengaruhi nilai efisiensi sel surya yang dihasilkan.

4.8 Perbandingan Tebal Lapisan Semikonduktor

Pada bagian ini akan dibahas mengenai dimensi yang paling baik untuk diterapkan pada penelitian ini. Variasi yang digunakan berupa konsentrasi donor dan akseptor yang masing-masing bernilai $10^{15}/\text{cm}^3$, $10^{17}/\text{cm}^3$ dan $10^{19}/\text{cm}^3$. Tebal sel surya ini didapatkan melalui persamaan (4.24) berikut

$$E(V/cm) = \frac{V_{oc}}{l(cm)} \quad (4.35)$$

Nilai medan listrik tiap lapisan sel (E) yang telah dihitung sebelumnya dan V yang merupakan V_{oc} pada sel surya, sedangkan l merupakan tebal sel.

Untuk sel surya pada lapisan dengan konsentrasi donor dan akseptor masing-masing sebesar $10^{15}/\text{cm}^3$, didapatkan dimensi terbaik yang ditunjukkan oleh Tabel 4.12.

Tabel 0.12 Ketebalan sel surya *double junction*, *triple junction* dan *multi junction* untuk konsentrasi donor dan akseptor $10^{15}/\text{cm}^3$

AlAs-InGaP	AlAs-InGaP-GaSb	AlAs-InGaP-GaSb-InAs
7,42 μm	12,05 μm	17,28 μm

Dari Tabel 4.12, diketahui bahwa untuk sel surya *multi junction* dengan konsentrasi donor dan akseptor $10^{15}/\text{cm}^3$ memiliki ketebalan yaitu 17,28 μm .

Sementara untuk sel surya dengan konsentrasi donor dan akseptor $10^{12}/\text{cm}^3$, dimensi yang didapatkan adalah seperti yang terlihat dalam Tabel 4.13 berikut

Tabel 0.13 Ketebalan sel surya *double junction*, *triple junction* dan *multi junction* untuk konsentrasi donor dan akseptor $10^{17}/\text{cm}^3$

AlAs-InGaP	AlAs-InGaP-GaSb	AlAs-InGaP-GaSb-InAs
7,09 μm	11,65 μm	16,83 μm

Dibandingkan dengan dimensi yang dimiliki oleh sel surya dengan konsentrasi donor dan akseptor $10^{15}/\text{cm}^3$, sel surya dengan konsentrasi donor dan akseptor $10^{17}/\text{cm}^3$ memiliki dimensi yang lebih rendah. Hal ini dikarenakan pada semakin tebal lapisan semikonduktor, nilai medan listrik akan semakin kecil. Dalam penelitian ini, nilai medan listrik mempengaruhi efisiensi yang dihasilkan. Jika nilai medan listrik tersebut makin kecil maka efisiensi yang dihasilkan akan semakin rendah. Selain medan listrik, konsentrasi donor dan akseptor juga berpengaruh terhadap efisiensi yang dihasilkan karena semakin banyak jumlah konsentrasi yang diterapkan dalam suatu lapisan maka makin banyak elektron yang mampu bereksitasi dan menghasilkan arus listrik sehingga efisiensi yang dihasilkan juga akan makin tinggi. Untuk sel surya dengan konsentrasi donor dan akseptor $10^{19}/\text{cm}^3$, dimensi yang dihasilkan ditunjukkan melalui Tabel 4.14.

Tabel 0.14 Ketebalan sel surya *double junction*, *triple junction* dan *multi junction* untuk konsentrasi donor dan akseptor $10^{19}/\text{cm}^3$

AlAs-InGaP	AlAs-InGaP-GaSb	AlAs-InGaP-GaSb-InAs
6,84 μm	11,28 μm	16,16 μm

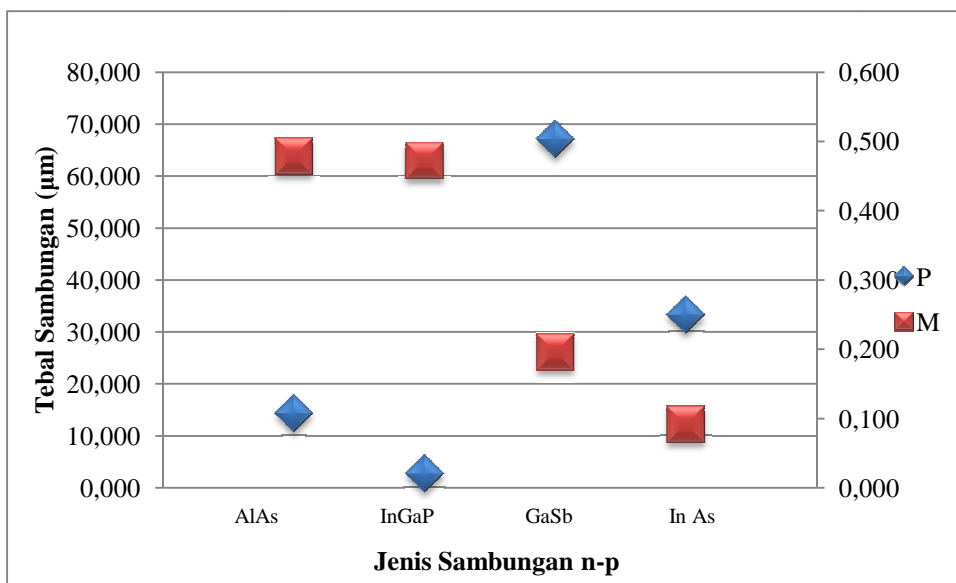
Dari Tabel 4.12, 4.13 dan 4.14 dapat diketahui bahwa untuk sel surya dengan efisiensi terbaik di dalam penelitian ini terdapat pada sel surya *multi junction* dengan konsentrasi donor dan akseptor masing-masing $10^{19}/\text{cm}^3$ yang memiliki tebal 16,16 μm .

Pada umumnya, nilai efisiensi sel surya *multijunction* golongan III-V adalah sebesar 39,1% dengan susunan bahan InGaP/GaAs/InGaAs (Green, 2015). Ada juga efisiensi sebesar 42,4% yang dicapai dengan susunan sel AlGaAs/ GaInAsP/ InGaAs/ Ge (Conolly, 2012). Sementara pencapaian terbesar efisiensi sel surya dihasilkan oleh susunan GaInP/ GaAs/ GaInAsP/ GaInAs yaitu 44,7% (Dimroth, 2006).

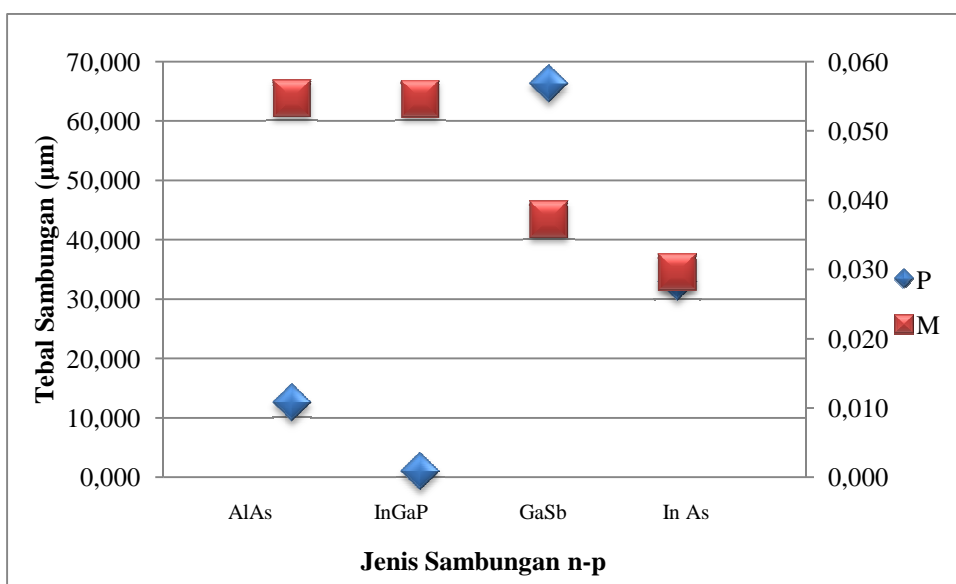
Untuk menentukan tebal lapisan sambungan *homojunction*, dapat digunakan persamaan (4.36) berikut :

$$t = L_n + W + L_p \quad (4.36)$$

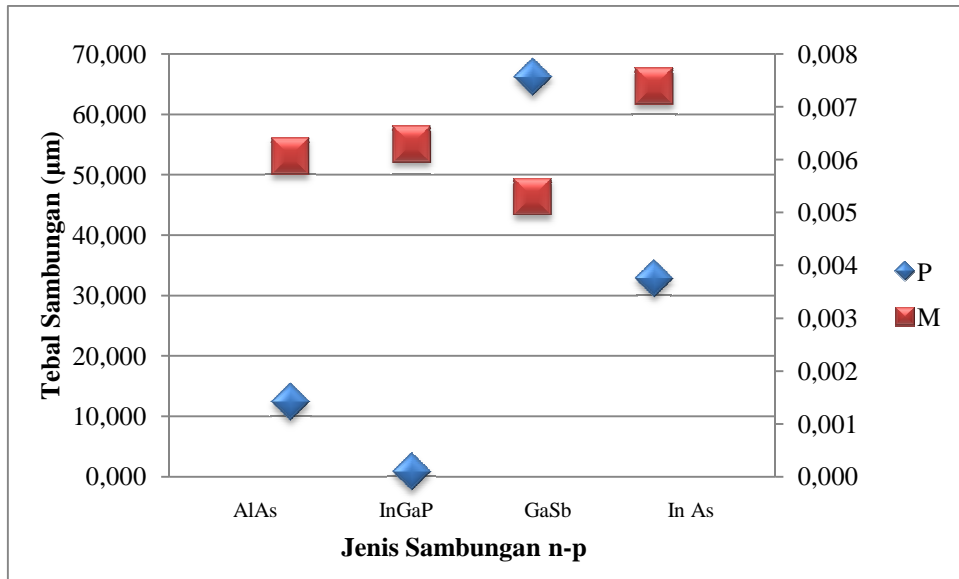
Selain itu, tebal lapisan sambungan *homojunction*, juga dapat diketahui melalui persamaan (4.35) dengan medan listrik menggunakan persamaan (4.21). Berdasarkan persamaan (4.36) dan persamaan (4.35) dengan medan listrik menggunakan persamaan (4.21) maka didapatkan tebal lapisan sambungan yang disajikan pada gambar 4.19 berikut dengan P merupakan tebal lapisan yang diperoleh dari persamaan (4.36) dan M merupakan tebal lapisan yang diperoleh dari persamaan (4.35) dengan medan listrik menggunakan persamaan (4.21).



(a)



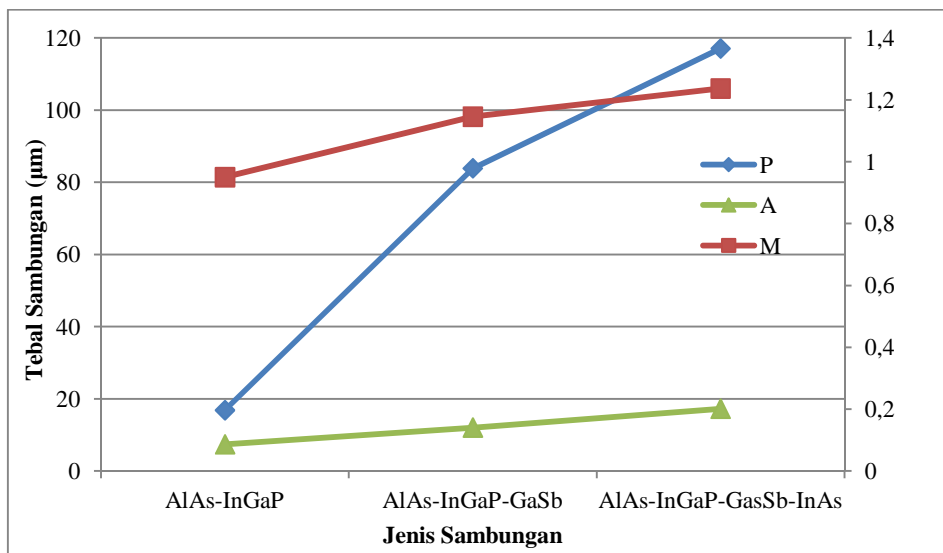
(b)



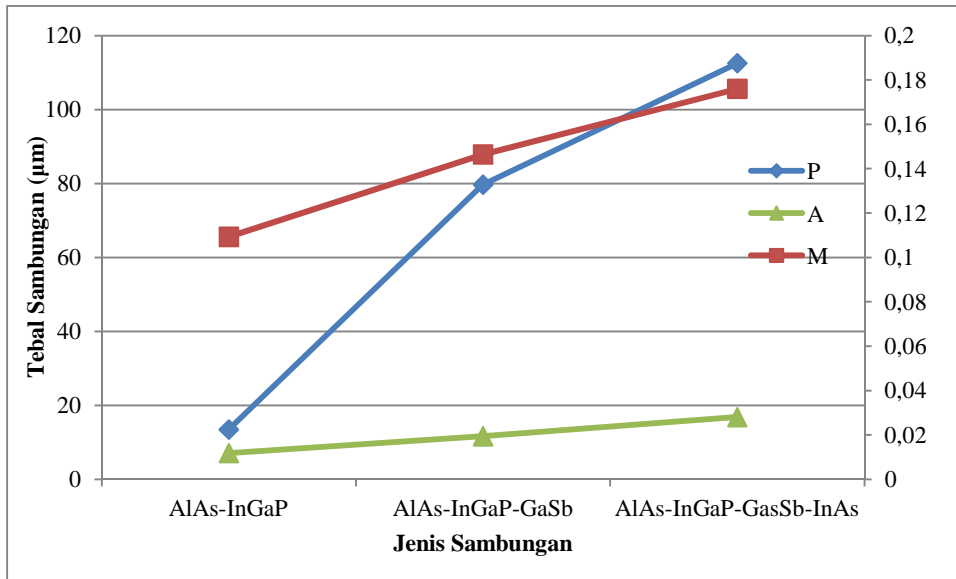
(c)

Gambar 4. 19 Grafik hubungan tebal sambungan n-p pada setiap material dengan konsentrasi doping (a) 10^{15} cm^{-3} (b) 10^{17} cm^{-3} (c) 10^{19} cm^{-3}

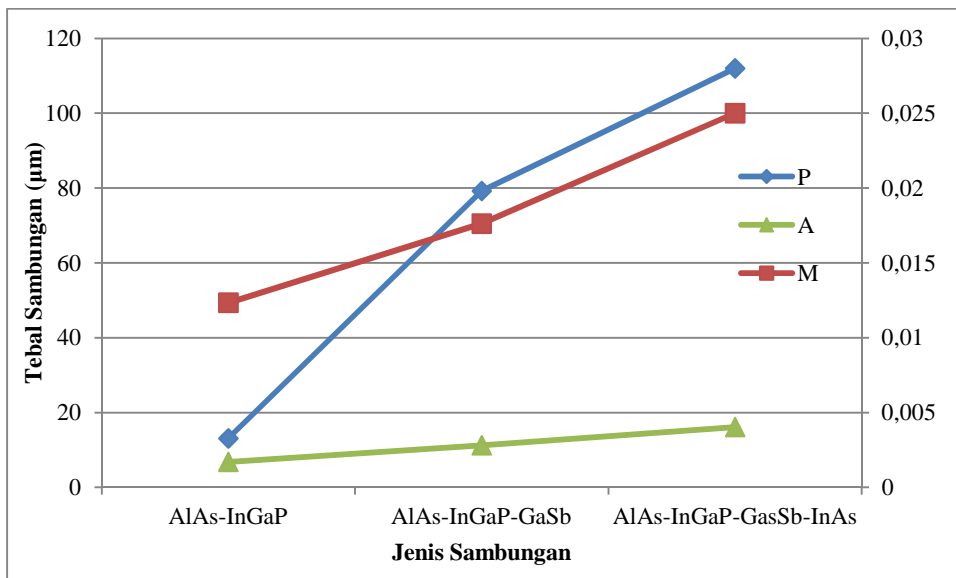
Dengan menjumlahkan masing-masing tebal sambungan maka didapatkan tebal total untuk masing-masing konsentrasi doping yang disajikan dalam gambar 4.20 berikut. P merupakan tebal total yang dihitung berdasarkan persamaan (4.36), A merupakan tebal total yang diperoleh dari persamaan (4.35) dengan medan listrik menggunakan persamaan (4.20) dan M merupakan tebal total yang diperoleh dari persamaan (4.35) dengan medan listrik menggunakan persamaan (4.21).



(a)



(b)



(c)

Gambar 4.20 Grafik hubungan tebal sambungan total pada setiap material dengan konsentrasi doping (a) 10^{15} cm^{-3} (b) 10^{17} cm^{-3} (c) 10^{19} cm^{-3}

Dari gambar 4.1, didapatkan bahwa tebal total akan semakin tipis jika konsentrasi doping dinaikan. Untuk semua konsentrasi diketahui bahwa tebal lapisan yang diprediksi melalui persamaan (4.35) dengan medan dari persamaan (4.20) berada pada rentang pendekatan teotitis berdasarkan persamaan (4.36) dan persamaan (4.35) dengan medan dari persamaan (4.21). Namun, berdasarkan persamaan (4.12) dan persamaan (4.13) dan tabel 4.4, tebal merupakan fungsi dari absorbansi (α), dengan persamaan tebal :

$$d_{\min} \geq \frac{2}{\alpha} \quad (4.37)$$

Jika jenis *bandgap indirect* (AlAs dan InGaP) maka mempunyai nilai absorbansi kecil sehingga lapisan yang terbentuk semakin tebal. Begitu sebaliknya, jika jenis *bandgap direct* (GaSb dan InAs) maka mempunyai nilai absorbansi besar sehingga lapisan yang terbentuk semakin tipis. Hal ini tidak sesuai dengan hasil perhitungan yang dilakukan, karena pada hasil perhitungan dengan persamaan (4.36), sambungan n-p yang paling tebal adalah dari material GaSb.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB V

KESIMPULAN

5.1 Kesimpulan

Dari penelitian yang telah dilakukan, dapat ditarik beberapa kesimpulan yang diantaranya yaitu:

1. Tebal lapisan yang diprediksi melalui persamaan (4.35) dengan medan dari persamaan (4.20) berada pada rentang pendekatan teotitis berdasarkan persamaan (4.36) dan persamaan (4.35) dengan medan dari persamaan (4.21). Pengaruh penambahan konsentrasi doping mengakibatkan semakin tebal lapisan yang dihasilkan semakin tipis.
2. Untuk sambungan *homojunction*, pengaruh penambahan konsentrasi doping mengakibatkan nilai I_{SC} akan turun sedangkan nilai V_{OC} akan naik.
3. Efisiensi tertinggi dicapai oleh sel surya *multijunction* AlAs-InGaP-GaSb-InAs dengan nilai sebesar 35,3 % pada konsentrasi doping 10^{19} cm^{-3} .

5.2 Saran

Terdapat beberapa saran pada penelitian ini, yaitu :

1. Perhitungan tebal lapisan sebaiknya memperhitungkan nilai absorbansi karena material yang digunakan mempunyai karakteristik *bandgap* yang tidak sama (*direct-indirect*).
2. Perhitungan untuk sambungan *heterojunction* sebaiknya juga dilakukan.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR PUSTAKA

- Adachi, S. (2005). 9 Electron Affinity and Schottky. *John Wiley&Sons, Ltd*, (ISBN: 0470090324).
- Ahrenkiel, R. K. (1992). Measurement of Minority-Carrier Lifetime by Time-Resolved PL, 35(3), 239–250.
- Andreev, V. M. (2012). *GaAs and High-Efficiency Space Cells. Practical Handbook of Photovoltaics* (pp. 397–416). Elsevier Ltd. <http://doi.org/10.1016/B978-0-12-385934-1.00012-X>, proceedings of the World Electrotechnology Congress. Moskow.
- Arafat, Y., Mohammedy, F. M., & Hassan, M. M. S. (2012). Optical and Other Measurement Techniques of Carrier Lifetime in Semiconductors, 2(2), 5–11. <http://doi.org/10.5923/j.ijoe.20120202.02>
- F.Dimroth. (2006). *High Efficiency Solar Cells from III-V Compound Semiconductors phys.stat.sol. (c) 3, No.3, 373-379/ DOI 10.1002/pssc.200564172*
- Fthenakis, V. M. (2012). *Potential Hazards. Practical Handbook of Photovoltaics* (pp. 1081–1096). New York: Elsevier Ltd. <http://doi.org/10.1016/B978-0-12-385934-1.00036-2>
- Green, M. A. (2012). *High-Efficiency Silicon Solar Cell Concepts. Practical Handbook of Photovoltaics* (pp. 99–128). Elsevier Ltd. <http://doi.org/10.1016/B978-0-12-385934-1.00005-2>
- Hagfeldt, A., Cappel, U. B., Boschloo, G., & Sun, L. (2012). *Dye-Sensitized Photoelectrochemical Cells. Practical Handbook of Photovoltaics* (pp. 477–542). Elsevier Ltd. <http://doi.org/10.1016/B978-0-12-385934-1.00015-5>
- James P. Connolly. (2012). *III-V Solar Cells*. Nanophotonic Technology Centre: Valencia, Spain
- Kroemer, H. (2004). The 6: 1 A family (InAs , GaSb , AlSb) and its heterostructures : a selective review, 20, 196–203. <http://doi.org/10.1016/j.physe.2003.08.003>
- Kurtz, S., Olson, A. J., Geisz, J., Wanlass, M., & McMahon, B. (2006). *High efficiency, multijunction solar cells for large-scale solar electricity generation*. United States.
- Landsberg, P. T., & Markvart, T. (2012). *Ideal Efficiencies. Practical Handbook of Photovoltaics* (pp. 63–76). Prog. Quantum Electron, Elsevier Ltd. <http://doi.org/10.1016/B978-0-12-385934-1.00003-9>

- Lundstrom, P. M. (2011). *Solar Cell Physics : recombination and generation*, (July).
- Mahakud, J. J. (2014). *Numerical Modelling of PIN Solar Cell* (pp. 1–30). Bangalore.
- Manzolini, R., & Humphrey, C. (2013). *Solar Electric Reliable and Pollution-Free Electricity*. Hopkinton.
- Martin A. (2015). *Solar Cell Efficiency Tables*. Progress in Photovoltaics: Research and Applications, Wiley online
- Markvart, T., & Castañer, L. (2012). *Principles of Solar Cell Operation. Practical Handbook of Photovoltaics* (pp. 7–32). Elsevier Ltd. <http://doi.org/10.1016/B978-0-12-385934-1.00001-5>
- Markvart, T., Mcevoy, A., Castañer, L., Martí, A., & Luque, A. L. (2011). *Books About Solar Cells , Photovoltaic Systems , and Applications. Practical Handbook of Photovoltaics* (pp. 1185–1188). Elsevier Ltd. <http://doi.org/10.1016/B978-0-12-385934-1.00053-2>
- Mart, A., & Luque, A. (2004). *High Efficiency Through Full Spectrum Utilization*. (R. Brown & E. R. Pike, Eds.) (Series in). Philadelphia: Institute of Physics Publishing.
- Nainani, A., Bennett, B. R., Boos, J. B., Ancona, M. G., & Krishna, C. (2012). *Enhancing hole mobility in III-V semiconductors*.
- Neudeck, Gerold. (1989). *The PN Junction Diode*. Addison-Wisley Publishing Company: New York
- Philipps, Hermle, & Letay. (2008). Numerical Simulation and Modelling of III-V Multi-Junction Solar Cells. *23rd European Photovoltaics Solar Energy Conference*, (September), 1–5.
- Philipps, S. P., Dimroth, F., & Bett, A. W. (2012). *High Efficiency III À V Multijunction Solar Cells. Practical Handbook of Photovoltaics* (pp. 417–448). Elsevier Ltd. <http://doi.org/10.1016/B978-0-12-385934-1.00013-1>
- Rana, F. (2011). *Review of Basic Semiconductor Physics*. Cornell University.
- Schubert, E. F. (2015). *Room temperature properties of semiconductors: III–V arsenides Quantity* (Vol. 1, p. 18).
- Setyowati. (2012). *Pengaruh Rapat Arus Terhadap Ketebalan dan Struktur Kristal Lapisan Nikel pada Tembaga*. Indonesian Journal of Applied Physics Vol.2 No.1

- Smith, F. G. (2007). *Optics and Photonics: An Introduction Second Edition* (second). USA: WILEY.
- S.M. Sze, 2002, *Semiconductor Devices Physics and Technology*, 2nd Ed., John Wiley & Sons, New York.
- Sukhoivanov, I. A. (2009). *Physics and Practical Modeling* (Optical Sc). Atlanta: Springer.
- W. Liu, W.T. Zheng, Q. Jiang, First-principles study of the surface energy and work function of III-
- Yang, L. M., & Pan, C. Y. (2015). Anti-reflection sub-wavelength structures design for InGaN-based solar cells performed by the finite-difference-time-domain (FDTD) simulation method. *Elsevier: Optics&Laser Technology*, 67, 72–77. <http://doi.org/10.1016/j.optlastec.2014.09.01>
- Yang, Y., & Altermatt, P. P. (2008). Simulation of Optical Properties of the Si / SiO₂ / Al Interface at the Rear of Industrially Fabricated Si Solar Cells. Proceedings of the COMSOL Conference 2006 Hannover.
- Zekry, A. (1998). *A Course on Photovoltaic Array System Lecture's Note*. Ain Shams University.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

LAMPIRAN

A. Rapat arus sel surya *multijunction*

Tegangan (V)	Rapat Arus (A/m ²)		
	<i>Double junction</i>	Triple junction	<i>Multi junction</i>
4,92	15,22	16,22	17,82
5,77	18,06	21,06	23,06
6,33		21,64	23,64
6,75			24,41

B. Penyederhanaan Persamaan Maxwell

Persamaan awal: $\nabla x \mu_r^{-1} (\nabla x E) - k_0^2 (\epsilon_r - \frac{\sigma}{\omega \epsilon_0}) E$

$$\nabla x (\nabla x E) = \int \frac{d^2 E_z}{dz^2} - \left[\frac{1}{\mu_r} \cdot k_0^2 \left(\epsilon_r - \frac{J\sigma}{\omega \epsilon_0} \right) \right] E_z$$

Menggunakan penyelesaian diferensial persamaan linear orde kedua sehingga didapatkan:

$$E = C_1 e^{\sqrt{\frac{1}{\mu_r} \cdot k_0^2 \left(\epsilon_r - \frac{J\sigma}{\omega \epsilon_0} \right)} z} + C_2 e^{-\sqrt{\frac{1}{\mu_r} \cdot k_0^2 \left(\epsilon_r - \frac{J\sigma}{\omega \epsilon_0} \right)} z}$$

C. Penyederhanaan Persamaan Difusi

Persamaan awal: $\nabla \cdot (-D_i \nabla C_i + u C_i) = R_i$

$$\nabla (-D_i \nabla C_i) = 0$$

$$-D_i \nabla (\nabla C_i) = 0$$

$$-D_i \nabla \left(\frac{dC_x}{dx} + \frac{dC_y}{dy} + \frac{dC_z}{dz} \right) = 0$$

$$-D_i \left(\frac{d^2 C_x}{dx^2} + \frac{d^2 C_y}{dy^2} + \frac{d^2 C_z}{dz^2} \right) = 0$$

$$C(x) = \sum_{n=1}^{\infty} (B \cos \lambda y + B^* \sin \lambda y) \sin \frac{\pi}{L} y$$

Untuk

$$B = \frac{2}{L} \left[\frac{L^2}{\pi} \cos \frac{\pi}{L} y \right]$$

$$B = \frac{2}{L} \int_0^L \sin \frac{n\pi y}{L} dy$$

$$B = \frac{2}{L} \left(-\cos \frac{n\pi x}{L} \right) \Big|_0^L \cdot \frac{L}{n\pi}$$

$$B = \frac{2}{n\pi}(-(-1) + 1)$$

$$B = \frac{4}{n\pi}$$

Untuk

$$B^* = \frac{2}{k\pi} \left[\frac{L^2}{\pi} \cos \frac{\pi}{L} y \right]$$

$$B^* = \frac{2}{kn\pi} \cdot 2 \cdot \frac{L}{n\pi}$$

$$B^* = \frac{4}{n\pi} \cdot \frac{L}{kn\pi}$$

Untuk

$$\lambda = \frac{k\pi}{L}$$

Sehingga

$$C(x) = \left[\left(\frac{4}{n\pi} \cos \lambda y + \frac{4}{n\pi} \cdot \frac{L}{kn\pi} \sin \lambda y \right) \sin \frac{\pi}{L} y \right] + \frac{1}{2} \frac{R_i}{d_i} y^2$$

$$C(x) = \frac{4}{n\pi} \sin \frac{\pi}{L} y \left(\cos \lambda y + \frac{L}{kn\pi} \sin \lambda y \right) + \frac{1}{2} \frac{R_i}{d_i} y^2$$

D. Perhitungan Distribusi Pembawa Muatan

AlAs	$N_A = N_D = 10^{15} \text{ cm}^{-3}$			
xn/yp (cm)	npo (cm-3)	2,477E-13	pno (cm-3)	2,4775E-13
	Vbi (V)	1,6463373		
	Ln (cm)	0,0007211	Lp (cm)	0,0005099
	Skala Linier		Skala Logaritma	
	n(x)	p(x)	ln n(x)	ln p(x)
-0,000606	1,588E+14	1,206E+15	32,69894	3,47E+01
-0,000579	1,649E+14	1,145E+15	32,736156	3,47E+01
-0,000552	1,711E+14	1,086E+15	32,773372	3,46E+01
-0,000525	1,776E+14	1,03E+15	32,810588	3,46E+01
-0,000498	1,843E+14	9,774E+14	32,847804	3,45E+01
-0,000471	1,913E+14	9,273E+14	32,885021	3,45E+01
-0,000445	1,986E+14	8,798E+14	32,922237	3,44E+01
-0,000418	2,061E+14	8,347E+14	32,959453	3,44E+01
-0,000391	2,139E+14	7,919E+14	32,996669	3,43E+01
-0,000364	2,22E+14	7,513E+14	33,033885	3,43E+01
-0,000337	2,305E+14	7,128E+14	33,071101	3,42E+01
-0,00031	2,392E+14	6,762E+14	33,108317	3,41E+01
-0,000284	2,483E+14	6,415E+14	33,145534	3,41E+01
-0,000257	2,577E+14	6,087E+14	33,18275	3,40E+01
-0,00023	2,675E+14	5,774E+14	33,219966	3,40E+01
-0,000203	2,776E+14	5,478E+14	33,257182	3,39E+01
-0,000176	2,881E+14	5,198E+14	33,294398	3,39E+01
-0,000149	2,99E+14	4,931E+14	33,331614	3,38E+01

AlAs	$N_A = N_D = 10^{15} \text{ cm}^{-3}$			
xn/xp (cm)	npo (cm-3)	2,477E-13	pno (cm-3)	2,4775E-13
	Vbi (V)	1,6463373		
	Ln (cm)	0,0007211	Lp (cm)	0,0005099
	Skala Linier		Skala Logaritma	
	n(x)	p(x)	ln n(x)	ln p(x)
-0,000123	3,104E+14	4,678E+14	33,36883	3,38E+01
-9,571E-05	3,222E+14	4,438E+14	33,406047	3,37E+01
-7,66E-05	3,308E+14	4,275E+14	33,432593	3,37E+01
-5,743E-05	3,397E+14	4,117E+14	33,459139	3,37E+01
-3,83E-05	3,489E+14	3,966E+14	33,485684	3,36E+01
-1,914E-05	3,582E+14	3,82E+14	33,51223	3,36E+01
0	3,679E+14	3,679E+14	33,538776	3,35E+01
1,914E-05	3,778E+14	3,543E+14	33,565322	3,35E+01
3,829E-05	3,879E+14	3,413E+14	33,591868	3,35E+01
5,743E-05	3,984E+14	3,287E+14	33,618414	3,34E+01
7,657E-05	4,091E+14	3,166E+14	33,64496	3,34E+01
9,571E-05	4,201E+14	3,049E+14	33,671506	3,34E+01
0,0001337	4,428E+14	2,83E+14	33,724138	3,33E+01
0,0001716	4,667E+14	2,627E+14	33,776769	3,32E+01
0,0002096	4,92E+14	2,439E+14	33,829401	3,31E+01
0,0002475	5,185E+14	2,264E+14	33,882032	3,31E+01
0,0002855	5,466E+14	2,102E+14	33,934664	3,30E+01
0,0003234	5,761E+14	1,951E+14	33,987296	3,29E+01
0,0003614	6,072E+14	1,811E+14	34,039927	3,28E+01
0,0003993	6,4E+14	1,681E+14	34,092559	3,28E+01
0,0004373	6,746E+14	1,56E+14	34,14519	3,27E+01
0,0004752	7,111E+14	1,449E+14	34,197822	3,26E+01
0,0005132	7,495E+14	1,345E+14	34,250454	3,25E+01
0,0005512	7,9E+14	1,248E+14	34,303085	3,25E+01
0,0005891	8,327E+14	1,159E+14	34,355717	3,24E+01
0,0006271	8,777E+14	1,076E+14	34,408348	3,23E+01
0,000665	9,252E+14	9,984E+13	34,46098	3,22E+01
0,000703	9,751E+14	9,268E+13	34,513611	3,22E+01
0,0007409	1,028E+15	8,603E+13	34,566243	3,21E+01
0,0007789	1,083E+15	7,986E+13	34,618875	3,20E+01
0,0008168	1,142E+15	7,413E+13	34,671506	3,19E+01

AIAs	$N_A = N_D = 10^{17} \text{ cm}^{-3}$			
xn/xp (cm)	npo (cm-3)	2,477E-15	pno (cm-3)	2,477E-15
	Vbi (V)	1,8848851		
	Ln (cm)	0,0007211	Lp (cm)	0,0005099
	Skala Linier		Skala Logaritma	
	n(x)	p(x)	ln n(x)	ln p(x)
-5,201E-04	1,788E+16	1,02E+17	37,4226381	39,164031
-4,933E-04	1,856E+16	9,68E+16	37,4598542	39,111399
-4,665E-04	1,927E+16	9,183E+16	37,4970704	39,058768
-4,396E-04	2E+16	8,713E+16	37,5342865	39,006136
-4,128E-04	2,075E+16	8,266E+16	37,5715027	38,953505
-3,860E-04	2,154E+16	7,842E+16	37,6087188	38,900873
-3,591E-04	2,236E+16	7,44E+16	37,645935	38,848241
-3,323E-04	2,321E+16	7,059E+16	37,6831511	38,79561
-3,054E-04	2,409E+16	6,697E+16	37,7203673	38,742978
-2,786E-04	2,5E+16	6,353E+16	37,7575834	38,690347
-2,518E-04	2,595E+16	6,028E+16	37,7947996	38,637715
-2,249E-04	2,693E+16	5,719E+16	37,8320157	38,585083
-1,981E-04	2,795E+16	5,425E+16	37,8692318	38,532452
-1,713E-04	2,901E+16	5,147E+16	37,906448	38,47982
-1,444E-04	3,011E+16	4,883E+16	37,9436641	38,427189
-1,176E-04	3,125E+16	4,633E+16	37,9808803	38,374557
-9,075E-05	3,244E+16	4,395E+16	38,0180964	38,321926
-6,391E-05	3,367E+16	4,17E+16	38,0553126	38,269294
-3,708E-05	3,494E+16	3,956E+16	38,0925287	38,216662
-1,024E-05	3,627E+16	3,753E+16	38,1297449	38,164031
-8,193E-06	3,637E+16	3,738E+16	38,1325852	38,160014
-6,145E-06	3,648E+16	3,723E+16	38,1354256	38,155997
-4,096E-06	3,658E+16	3,708E+16	38,1382659	38,15198
-2,048E-06	3,668E+16	3,694E+16	38,1411062	38,147963
0,0E+00	3,679E+16	3,679E+16	38,1439466	38,143947
2,048E-06	3,689E+16	3,664E+16	38,1467869	38,13993
4,096E-06	3,7E+16	3,649E+16	38,1496273	38,135913
6,145E-06	3,71E+16	3,635E+16	38,1524676	38,131896
8,193E-06	3,721E+16	3,62E+16	38,155308	38,127879
1,024E-05	3,731E+16	3,606E+16	38,1581483	38,123862
4,819E-05	3,933E+16	3,347E+16	38,2107799	38,04943
8,615E-05	4,146E+16	3,107E+16	38,2634115	37,974998
1,241E-04	4,37E+16	2,884E+16	38,316043	37,900565
1,621E-04	4,606E+16	2,677E+16	38,3686746	37,826133
2,000E-04	4,855E+16	2,485E+16	38,4213062	37,751701
2,380E-04	5,117E+16	2,307E+16	38,4739378	37,677269
2,759E-04	5,394E+16	2,141E+16	38,5265693	37,602836
3,139E-04	5,685E+16	1,988E+16	38,5792009	37,528404
3,518E-04	5,992E+16	1,845E+16	38,6318325	37,453972

AlAs	$N_A = N_D = 10^{17} \text{ cm}^{-3}$			
xn/xp (cm)	npo (cm-3)	2,477E-15	pno (cm-3)	2,477E-15
	Vbi (V)	1,8848851		
	Ln (cm)	0,0007211	Lp (cm)	0,0005099
	Skala Linier		Skala Logaritma	
	n(x)	p(x)	ln n(x)	ln p(x)
3,898E-04	6,316E+16	1,713E+16	38,6844641	37,379539
4,277E-04	6,657E+16	1,59E+16	38,7370957	37,305107
4,657E-04	7,017E+16	1,476E+16	38,7897272	37,230675
5,036E-04	7,396E+16	1,37E+16	38,8423588	37,156243
5,416E-04	7,796E+16	1,272E+16	38,8949904	37,08181
5,795E-04	8,217E+16	1,181E+16	38,947622	37,007378
6,175E-04	8,662E+16	1,096E+16	39,0002536	36,932946
6,554E-04	9,13E+16	1,017E+16	39,0528851	36,858513
6,934E-04	9,623E+16	9,443E+15	39,1055167	36,784081
7,314E-04	1,014E+17	8,766E+15	39,1581483	36,709649

AlAs	$N_A = N_D = 10^{19} \text{ cm}^{-3}$			
xn/xp (cm)	npo (cm-3)	2,477E-17	pno (cm-3)	2,477E-17
	Vbi (V)	2,123433		
	Ln (cm)	0,0007211	Lp (cm)	0,0005099
	Skala Linier		Skala Logaritma	
	n(x)	p(x)	ln n(x)	ln p(x)
-0,000511	1,8112E+18	1,002E+19	42,040503	43,751249
-0,000484	1,8798E+18	9,508E+18	42,077719	43,698617
-0,000457	1,9511E+18	9,02E+18	42,114935	43,645985
-0,00043	2,0251E+18	8,558E+18	42,152151	43,593354
-0,000404	2,1019E+18	8,119E+18	42,189367	43,540722
-0,000377	2,1816E+18	7,703E+18	42,226583	43,488091
-0,00035	2,2643E+18	7,308E+18	42,263799	43,435459
-0,000323	2,3502E+18	6,933E+18	42,301016	43,382827
-0,000296	2,4393E+18	6,578E+18	42,338232	43,330196
-0,000269	2,5318E+18	6,24E+18	42,375448	43,277564
-0,000243	2,6278E+18	5,92E+18	42,412664	43,224933
-0,000216	2,7274E+18	5,617E+18	42,44988	43,172301
-0,000189	2,8308E+18	5,329E+18	42,487096	43,11967
-0,000162	2,9382E+18	5,056E+18	42,524312	43,067038
-0,000135	3,0496E+18	4,796E+18	42,561529	43,014406
-0,000108	3,1652E+18	4,551E+18	42,598745	42,961775
-8,16E-05	3,2852E+18	4,317E+18	42,635961	42,909143
-5,48E-05	3,4098E+18	4,096E+18	42,673177	42,856512
-2,79E-05	3,5391E+18	3,886E+18	42,710393	42,80388
-1,087E-06	3,6733E+18	3,687E+18	42,747609	42,751249
-8,7E-07	3,6744E+18	3,685E+18	42,747911	42,750822

AlAs	$N_A = N_D = 10^{19} \text{ cm}^{-3}$			
xn/yp (cm)	npo (cm-3)	2,477E-17	pno (cm-3)	2,477E-17
	Vbi (V)	2,123433		
	Ln (cm)	0,0007211	Lp (cm)	0,0005099
	Skala Linier		Skala Logaritma	
	n(x)	p(x)	ln n(x)	ln p(x)
-6,522E-07	3,6755E+18	3,684E+18	42,748212	42,750396
-4,35E-07	3,6766E+18	3,682E+18	42,748514	42,749969
-2,174E-07	3,6777E+18	3,68E+18	42,748815	42,749543
0	3,6788E+18	3,679E+18	42,749117	42,749117
2,174E-07	3,6799E+18	3,677E+18	42,749418	42,74869
4,348E-07	3,681E+18	3,676E+18	42,74972	42,748264
6,522E-07	3,6821E+18	3,674E+18	42,750021	42,747838
8,696E-07	3,6832E+18	3,673E+18	42,750323	42,747411
1,087E-06	3,6843E+18	3,671E+18	42,750624	42,746985
3,904E-05	3,8835E+18	3,408E+18	42,803256	42,672553
7,699E-05	4,0933E+18	3,163E+18	42,855887	42,59812
0,0001149	4,3145E+18	2,936E+18	42,908519	42,523688
0,0001529	4,5477E+18	2,726E+18	42,96115	42,449256
0,0001909	4,7934E+18	2,53E+18	43,013782	42,374824
0,0002288	5,0525E+18	2,349E+18	43,066414	42,300391
0,0002668	5,3255E+18	2,18E+18	43,119045	42,225959
0,0003047	5,6133E+18	2,024E+18	43,171677	42,151527
0,0003427	5,9167E+18	1,879E+18	43,224308	42,077094
0,0003806	6,2364E+18	1,744E+18	43,27694	42,002662
0,0004186	6,5735E+18	1,619E+18	43,329572	41,92823
0,0004565	6,9287E+18	1,503E+18	43,382203	41,853797
0,0004945	7,3031E+18	1,395E+18	43,434835	41,779365
0,0005324	7,6978E+18	1,295E+18	43,487466	41,704933
0,0005704	8,1138E+18	1,202E+18	43,540098	41,630501
0,0006083	8,5523E+18	1,116E+18	43,592729	41,556068
0,0006463	9,0145E+18	1,036E+18	43,645361	41,481636
0,0006842	9,5016E+18	9,614E+17	43,697993	41,407204
0,0007222	1,0015E+19	8,925E+17	43,750624	41,332771

InGaP	$N_A = N_D = 10^{15} \text{ cm}^{-3}$			
xn/xp (cm)	npo (cm-3)	9,519E-09	pno (cm-3)	9,5192E-09
	Vbi (V)	1,3729261		
	Ln (cm)	7,071E-05	Lp (cm)	3,5847E-06
	Skala Linier		Skala Logaritma	
	n(x)	p(x)	ln n(x)	ln p(x)
-9,82E-05	9,168E+13	2,941E+26	32,149357	6,09E+01
-9,81E-05	9,193E+13	2,791E+26	32,152025	6,09E+01
-9,79E-05	9,217E+13	2,648E+26	32,154693	6,08E+01
-9,77E-05	9,242E+13	2,512E+26	32,157361	6,08E+01
-9,75E-05	9,267E+13	2,383E+26	32,16003	6,07E+01
-9,73E-05	9,291E+13	2,261E+26	32,162698	6,07E+01
-9,71E-05	9,316E+13	2,145E+26	32,165366	6,06E+01
-9,69E-05	9,341E+13	2,035E+26	32,168034	6,06E+01
-9,67E-05	9,366E+13	1,931E+26	32,170702	6,05E+01
-9,65E-05	9,391E+13	1,832E+26	32,17337	6,05E+01
-9,64E-05	9,416E+13	1,738E+26	32,176039	6,04E+01
-9,62E-05	9,441E+13	1,649E+26	32,178707	6,04E+01
-9,6E-05	9,467E+13	1,564E+26	32,181375	6,03E+01
-9,58E-05	9,492E+13	1,484E+26	32,184043	6,03E+01
-9,56E-05	9,517E+13	1,408E+26	32,186711	6,02E+01
-9,54E-05	9,543E+13	1,336E+26	32,189379	6,02E+01
-9,52E-05	9,568E+13	1,267E+26	32,192048	6,01E+01
-9,5E-05	9,594E+13	1,202E+26	32,194716	6,01E+01
-9,49E-05	9,619E+13	1,141E+26	32,197384	6,00E+01
-9,466E-05	9,645E+13	1,082E+26	32,200052	5,99E+01
-7,57E-05	1,261E+14	5,502E+23	32,467797	5,47E+01
-5,680E-05	1,648E+14	2,798E+21	32,735542	4,94E+01
-3,79E-05	2,154E+14	1,423E+19	33,003287	4,41E+01
-1,893E-05	2,815E+14	7,235E+16	33,271032	3,88E+01
0	3,679E+14	3,679E+14	33,538776	3,35E+01
1,893E-05	4,808E+14	1,871E+12	33,806521	2,83E+01
3,786E-05	6,284E+14	9,512E+09	34,074266	2,30E+01
5,680E-05	8,214E+14	48369284	34,342011	1,77E+01
7,573E-05	1,074E+15	245956,16	34,609756	1,24E+01
9,466E-05	1,403E+15	1250,6787	34,877501	7,13E+00
9,838E-05	1,479E+15	442,85592	34,930132	6,09E+00
0,0001021	1,559E+15	156,81195	34,982764	5,06E+00
0,0001058	1,643E+15	55,525932	35,035395	4,02E+00
0,0001095	1,732E+15	19,661315	35,088027	2,98E+00
0,0001133	1,826E+15	6,9619237	35,140659	1,94E+00
0,000117	1,924E+15	2,4651648	35,19329	9,02E-01
0,0001207	2,028E+15	0,8728963	35,245922	-1,36E-01
0,0001244	2,138E+15	0,309086	35,298553	-1,17E+00
0,0001282	2,253E+15	0,109445	35,351185	-2,21E+00

InGaP	$N_A = N_D = 10^{15} \text{ cm}^{-3}$			
xn/xp (cm)	npo (cm-3)	9,519E-09	pno (cm-3)	9,5192E-09
	Vbi (V)	1,3729261		
	Ln (cm)	7,071E-05	Lp (cm)	3,5847E-06
	Skala Linier		Skala Logaritma	
	n(x)	p(x)	ln n(x)	ln p(x)
0,0001319	2,375E+15	0,0387537	35,403816	-3,25E+00
0,0001356	2,503E+15	0,0137224	35,456448	-4,29E+00
0,0001393	2,639E+15	0,004859	35,50908	-5,33E+00
0,000143	2,781E+15	0,0017205	35,561711	-6,37E+00
0,0001468	2,932E+15	0,0006092	35,614343	-7,40E+00
0,0001505	3,09E+15	0,0002157	35,666974	-8,44E+00
0,0001542	3,257E+15	7,64E-05	35,719606	-9,48E+00
0,0001579	3,433E+15	2,706E-05	35,772237	-1,05E+01
0,0001617	3,619E+15	9,587E-06	35,824869	-1,16E+01
0,0001654	3,814E+15	3,401E-06	35,877501	-1,26E+01

InGaP	$N_A = N_D = 10^{17} \text{ cm}^{-3}$			
xn/xp (cm)	npo (cm-3)	9,519E-11	pno (cm-3)	9,519E-11
	Vbi (V)	1,6114739		
	Ln (cm)	7,071E-05	Lp (cm)	3,585E-06
	Skala Linier		Skala Logaritma	
	n(x)	p(x)	ln n(x)	ln p(x)
-1,4E-05	3,025E+16	1,748E+18	37,9482097	42,005003
-1,4E-05	3,033E+16	1,658E+18	37,9508778	41,952372
-1,3E-05	3,041E+16	1,573E+18	37,953546	41,89974
-1,3E-05	3,049E+16	1,493E+18	37,9562142	41,847108
-1,3E-05	3,057E+16	1,416E+18	37,9588823	41,794477
-1,3E-05	3,065E+16	1,344E+18	37,9615505	41,741845
-1,3E-05	3,074E+16	1,275E+18	37,9642187	41,689214
-1,3E-05	3,082E+16	1,209E+18	37,9668868	41,636582
-1,2E-05	3,09E+16	1,147E+18	37,969555	41,583951
-1,2E-05	3,098E+16	1,088E+18	37,9722232	41,531319
-1,2E-05	3,107E+16	1,033E+18	37,9748913	41,478687
-1,2E-05	3,115E+16	9,797E+17	37,9775595	41,426056
-1,2E-05	3,123E+16	9,295E+17	37,9802277	41,373424
-1,1E-05	3,132E+16	8,818E+17	37,9828958	41,320793
-1,1E-05	3,14E+16	8,366E+17	37,985564	41,268161
-1,1E-05	3,148E+16	7,937E+17	37,9882322	41,215529
-1,1E-05	3,157E+16	7,53E+17	37,9909003	41,162898
-1,1E-05	3,165E+16	7,144E+17	37,9935685	41,110266
-1,0E-05	3,174E+16	6,778E+17	37,9962367	41,057635
-1,026E-05	3,182E+16	6,431E+17	37,9989048	41,005003
-8,2E-06	3,276E+16	3,629E+17	38,0279132	40,432792

InGaP	$N_A = N_D = 10^{17} \text{ cm}^{-3}$			
xn/xp (cm)	npo (cm-3)	9,519E-11	pno (cm-3)	9,519E-11
	Vbi (V)	1,6114739		
	Ln (cm)	7,071E-05	Lp (cm)	3,585E-06
	Skala Linier		Skala Logaritma	
	n(x)	p(x)	ln n(x)	ln p(x)
-6,154E-06	3,372E+16	2,048E+17	38,0569215	39,860581
-4,1E-06	3,471E+16	1,155E+17	38,0859299	39,288369
-2,051E-06	3,574E+16	6,519E+16	38,1149382	38,716158
0,0E+00	3,679E+16	3,679E+16	38,1439466	38,143947
2,051E-06	3,787E+16	2,076E+16	38,1729549	37,571735
4,1E-06	3,899E+16	1,171E+16	38,2019633	36,999524
6,154E-06	4,013E+16	6,61E+15	38,2309716	36,427313
8,2E-06	4,131E+16	3,73E+15	38,25998	35,855101
1,026E-05	4,253E+16	2,105E+15	38,2889883	35,28289
1,4E-05	4,483E+16	7,452E+14	38,3416199	34,244693
1,8E-05	4,725E+16	2,639E+14	38,3942515	33,206496
2,1E-05	4,98E+16	9,344E+13	38,4468831	32,168299
2,5E-05	5,25E+16	3,309E+13	38,4995146	31,130101
2,9E-05	5,533E+16	1,172E+13	38,5521462	30,091904
3,3E-05	5,832E+16	4,148E+12	38,6047778	29,053707
3,6E-05	6,148E+16	1,469E+12	38,6574094	28,01551
4,0E-05	6,48E+16	5,201E+11	38,710041	26,977313
4,4E-05	6,83E+16	1,842E+11	38,7626725	25,939116
4,7E-05	7,199E+16	6,521E+10	38,8153041	24,900918
5,1E-05	7,588E+16	2,309E+10	38,8679357	23,862721
5,5E-05	7,998E+16	8,176E+09	38,9205673	22,824524
5,9E-05	8,43E+16	2,895E+09	38,9731989	21,786327
6,2E-05	8,886E+16	1,025E+09	39,0258304	20,74813
6,6E-05	9,366E+16	363006957	39,078462	19,709933
7,0E-05	9,872E+16	128538033	39,1310936	18,671735
7,4E-05	1,041E+17	45514351	39,1837252	17,633538
7,7E-05	1,097E+17	16116289	39,2363567	16,595341
8,1E-05	1,156E+17	5706656,8	39,2889883	15,557144

InGaP	$N_A = N_D = 10^{19} \text{ cm}^{-3}$			
xn/xp (cm)	npo (cm-3)	9,519E-13	pno (cm-3)	9,519E-13
	Vbi (V)	1,8500217		
	Ln (cm)	7,071E-05	Lp (cm)	3,585E-06
	Skala Linier		Skala Logaritma	
	n(x)	p(x)	ln n(x)	ln p(x)
-4,68E-06	3,443E+18	1,359E+19	42,682881	44,055659
-4,49E-06	3,4522E+18	1,289E+19	42,68555	44,003028
-4,31E-06	3,4614E+18	1,223E+19	42,688218	43,950396
-4,12E-06	3,4707E+18	1,16E+19	42,690886	43,897765
-3,93E-06	3,48E+18	1,101E+19	42,693554	43,845133
-3,74E-06	3,4893E+18	1,044E+19	42,696222	43,792501
-3,55E-06	3,4986E+18	9,908E+18	42,69889	43,73987
-3,36E-06	3,5079E+18	9,4E+18	42,701559	43,687238
-3,17E-06	3,5173E+18	8,918E+18	42,704227	43,634607
-2,99E-06	3,5267E+18	8,461E+18	42,706895	43,581975
-2,8E-06	3,5361E+18	8,027E+18	42,709563	43,529344
-2,61E-06	3,5456E+18	7,615E+18	42,712231	43,476712
-2,42E-06	3,555E+18	7,225E+18	42,714899	43,42408
-2,23E-06	3,5645E+18	6,855E+18	42,717568	43,371449
-2,04E-06	3,5741E+18	6,503E+18	42,720236	43,318817
-1,85E-06	3,5836E+18	6,17E+18	42,722904	43,266186
-1,66E-06	3,5932E+18	5,853E+18	42,725572	43,213554
-1,48E-06	3,6028E+18	5,553E+18	42,72824	43,160922
-1,29E-06	3,6124E+18	5,269E+18	42,730908	43,108291
-1,099E-06	3,6221E+18	4,998E+18	42,733577	43,055659
-8,79E-07	3,6333E+18	4,701E+18	42,736685	42,994351
-6,593E-07	3,6447E+18	4,422E+18	42,739793	42,933042
-4,4E-07	3,656E+18	4,159E+18	42,742901	42,871734
-2,198E-07	3,6674E+18	3,911E+18	42,746009	42,810425
0	3,6788E+18	3,679E+18	42,749117	42,749117
2,198E-07	3,6902E+18	3,46E+18	42,752225	42,687808
4,395E-07	3,7017E+18	3,254E+18	42,755333	42,6265
6,593E-07	3,7133E+18	3,061E+18	42,758441	42,565191
8,791E-07	3,7248E+18	2,879E+18	42,761549	42,503883
1,099E-06	3,7364E+18	2,708E+18	42,764657	42,442574
4,82E-06	3,9383E+18	9,587E+17	42,817289	41,404377
8,542E-06	4,1512E+18	3,395E+17	42,86992	40,36618
1,226E-05	4,3755E+18	1,202E+17	42,922552	39,327983
1,599E-05	4,612E+18	4,256E+16	42,975183	38,289786
1,971E-05	4,8612E+18	1,507E+16	43,027815	37,251588
2,343E-05	5,1239E+18	5,337E+15	43,080446	36,213391
2,715E-05	5,4008E+18	1,89E+15	43,133078	35,175194
3,087E-05	5,6927E+18	6,691E+14	43,18571	34,136997
3,459E-05	6,0003E+18	2,369E+14	43,238341	33,0988

InGaP	$N_A = N_D = 10^{19} \text{ cm}^{-3}$			
xn/xp (cm)	npo (cm-3)	9,519E-13	pno (cm-3)	9,519E-13
	Vbi (V)	1,8500217		
	Ln (cm)	7,071E-05	Lp (cm)	3,585E-06
	Skala Linier		Skala Logaritma	
	n(x)	p(x)	ln n(x)	ln p(x)
3,832E-05	6,3246E+18	8,39E+13	43,290973	32,060603
4,204E-05	6,6664E+18	2,971E+13	43,343604	31,022405
4,576E-05	7,0266E+18	1,052E+13	43,396236	29,984208
4,948E-05	7,4063E+18	3,725E+12	43,448868	28,946011
5,32E-05	7,8066E+18	1,319E+12	43,501499	27,907814
5,692E-05	8,2285E+18	4,67E+11	43,554131	26,869617
6,064E-05	8,6731E+18	1,654E+11	43,606762	25,83142
6,437E-05	9,1418E+18	5,855E+10	43,659394	24,793222
6,809E-05	9,6359E+18	2,073E+10	43,712025	23,755025
7,181E-05	1,0157E+19	7,342E+09	43,764657	22,716828

GaSb	$N_A = N_D = 10^{15} \text{ cm}^{-3}$			
xn/xp (cm)	npo (cm-3)	1,1E+10	pno (cm-3)	1,1004E+10
	Vbi (V)	0,2957063		
	Ln (cm)	0,0027386	Lp (cm)	0,00387298
	Skala Linier		Skala Logaritma	
	n(x)	p(x)	ln n(x)	ln p(x)
-0,003918	8,798E+13	1,012E+15	32,108177	3,46E+01
-0,003714	9,478E+13	9,599E+14	32,182601	3,45E+01
-0,003511	1,021E+14	9,107E+14	32,257024	3,44E+01
-0,003307	1,1E+14	8,64E+14	32,331449	3,44E+01
-0,003103	1,185E+14	8,197E+14	32,405874	3,43E+01
-0,002899	1,276E+14	7,777E+14	32,4803	3,43E+01
-0,002695	1,375E+14	7,378E+14	32,554726	3,42E+01
-0,002491	1,481E+14	7E+14	32,629152	3,42E+01
-0,002287	1,596E+14	6,641E+14	32,703579	3,41E+01
-0,002084	1,719E+14	6,3E+14	32,778007	3,41E+01
-0,00188	1,852E+14	5,977E+14	32,852434	3,40E+01
-0,001676	1,995E+14	5,671E+14	32,926862	3,40E+01
-0,001472	2,149E+14	5,38E+14	33,001291	3,39E+01
-0,001268	2,315E+14	5,104E+14	33,075719	3,39E+01
-0,001064	2,494E+14	4,843E+14	33,150148	3,38E+01
-0,000861	2,687E+14	4,594E+14	33,224577	3,38E+01
-0,000657	2,895E+14	4,359E+14	33,299007	3,37E+01
-0,000453	3,118E+14	4,135E+14	33,373436	3,37E+01
-0,000249	3,359E+14	3,923E+14	33,447866	3,36E+01
-4,522E-05	3,619E+14	3,722E+14	33,522296	3,36E+01
-3,62E-05	3,631E+14	3,713E+14	33,525598	3,35E+01

GaSb	$N_A = N_D = 10^{15} \text{ cm}^{-3}$			
xn/xp (cm)	npo (cm-3)	1,1E+10	pno (cm-3)	1,1004E+10
	Vbi (V)	0,2957063		
	Ln (cm)	0,0027386	Lp (cm)	0,00387298
	Skala Linier		Skala Logaritma	
	n(x)	p(x)	ln n(x)	ln p(x)
-2,713E-05	3,643E+14	3,705E+14	33,5289	3,35E+01
-1,81E-05	3,655E+14	3,696E+14	33,532202	3,35E+01
-9,043E-06	3,667E+14	3,688E+14	33,535504	3,35E+01
0	3,679E+14	3,679E+14	33,538806	3,35E+01
9,043E-06	3,691E+14	3,67E+14	33,542108	3,35E+01
1,809E-05	3,703E+14	3,662E+14	33,54541	3,35E+01
2,713E-05	3,716E+14	3,653E+14	33,548712	3,35E+01
3,617E-05	3,728E+14	3,645E+14	33,552014	3,35E+01
4,522E-05	3,74E+14	3,636E+14	33,555317	3,35E+01
0,0001894	3,942E+14	3,503E+14	33,607947	3,35E+01
0,0003335	4,155E+14	3,375E+14	33,660577	3,35E+01
0,0004776	4,38E+14	3,252E+14	33,713207	3,34E+01
0,0006218	4,617E+14	3,133E+14	33,765837	3,34E+01
0,0007659	4,866E+14	3,019E+14	33,818468	3,33E+01
0,00091	5,129E+14	2,909E+14	33,871098	3,33E+01
0,0010542	5,406E+14	2,802E+14	33,923729	3,33E+01
0,0011983	5,698E+14	2,7E+14	33,976359	3,32E+01
0,0013425	6,006E+14	2,601E+14	34,02899	3,32E+01
0,0014866	6,331E+14	2,506E+14	34,08162	3,32E+01
0,0016307	6,673E+14	2,415E+14	34,134251	3,31E+01
0,0017749	7,034E+14	2,326E+14	34,186882	3,31E+01
0,001919	7,414E+14	2,242E+14	34,239512	3,30E+01
0,0020631	7,814E+14	2,16E+14	34,292143	3,30E+01
0,0022073	8,237E+14	2,081E+14	34,344774	3,30E+01
0,0023514	8,682E+14	2,005E+14	34,397405	3,29E+01
0,0024956	9,151E+14	1,931E+14	34,450036	3,29E+01
0,0026397	9,645E+14	1,861E+14	34,502667	3,29E+01
0,0027838	1,017E+15	1,793E+14	34,555298	3,28E+01

GaSb	$N_A = N_D = 10^{17} \text{ cm}^{-3}$			
xn/xp (cm)	npo (cm-3)	110042323	pno (cm-3)	110042323
	Vbi (V)	0,5342541		
	Ln (cm)	0,0027386	Lp (cm)	0,003873
	Skala Linier		Skala Logaritma	
	n(x)	p(x)	ln n(x)	ln p(x)
-3,9E-03	8,924E+15	1,002E+17	36,7275138	39,145516
-3,7E-03	9,614E+15	9,502E+16	36,8019461	39,092884
-3,5E-03	1,036E+16	9,015E+16	36,8763784	39,040253
-3,3E-03	1,116E+16	8,553E+16	36,9508106	38,987621
-3,1E-03	1,202E+16	8,114E+16	37,0252429	38,93499
-2,9E-03	1,295E+16	7,698E+16	37,0996752	38,882358
-2,7E-03	1,395E+16	7,304E+16	37,1741075	38,829726
-2,5E-03	1,503E+16	6,929E+16	37,2485398	38,777095
-2,2E-03	1,619E+16	6,574E+16	37,3229721	38,724463
-2,0E-03	1,744E+16	6,237E+16	37,3974044	38,671832
-1,8E-03	1,879E+16	5,917E+16	37,4718367	38,6192
-1,6E-03	2,024E+16	5,614E+16	37,546269	38,566568
-1,4E-03	2,18E+16	5,326E+16	37,6207013	38,513937
-1,2E-03	2,348E+16	5,053E+16	37,6951336	38,461305
-1,0E-03	2,53E+16	4,794E+16	37,7695659	38,408674
-8,2E-04	2,725E+16	4,548E+16	37,8439982	38,356042
-6,2E-04	2,936E+16	4,315E+16	37,9184304	38,303411
-4,1E-04	3,163E+16	4,094E+16	37,9928627	38,250779
-2,1E-04	3,407E+16	3,884E+16	38,067295	38,198147
-6,078E-06	3,671E+16	3,685E+16	38,1417273	38,145516
-4,9E-06	3,672E+16	3,683E+16	38,1421712	38,145202
-3,647E-06	3,674E+16	3,682E+16	38,142615	38,144888
-2,4E-06	3,676E+16	3,681E+16	38,1430589	38,144574
-1,216E-06	3,677E+16	3,68E+16	38,1435027	38,14426
0,0E+00	3,679E+16	3,679E+16	38,1439466	38,143947
1,216E-06	3,68E+16	3,678E+16	38,1443904	38,143633
2,4E-06	3,682E+16	3,676E+16	38,1448343	38,143319
3,647E-06	3,684E+16	3,675E+16	38,1452781	38,143005
4,9E-06	3,685E+16	3,674E+16	38,145722	38,142691
6,078E-06	3,687E+16	3,673E+16	38,1461658	38,142377
1,5E-04	3,886E+16	3,539E+16	38,1987974	38,105161
2,9E-04	4,096E+16	3,41E+16	38,251429	38,067945
4,4E-04	4,318E+16	3,285E+16	38,3040606	38,030729
5,8E-04	4,551E+16	3,165E+16	38,3566922	37,993513
7,3E-04	4,797E+16	3,049E+16	38,4093237	37,956297
8,7E-04	5,056E+16	2,938E+16	38,4619553	37,91908
1,0E-03	5,329E+16	2,831E+16	38,5145869	37,881864
1,2E-03	5,617E+16	2,727E+16	38,5672185	37,844648
1,3E-03	5,921E+16	2,628E+16	38,6198501	37,807432

GaSb	$N_A = N_D = 10^{17} \text{ cm}^{-3}$			
xn/xp (cm)	npo (cm-3)	110042323	pno (cm-3)	110042323
	Vbi (V)	0,5342541		
	Ln (cm)	0,0027386	Lp (cm)	0,003873
	Skala Linier		Skala Logaritma	
	n(x)	p(x)	ln n(x)	ln p(x)
1,4E-03	6,241E+16	2,532E+16	38,6724816	37,770216
1,6E-03	6,578E+16	2,439E+16	38,7251132	37,733
1,7E-03	6,934E+16	2,35E+16	38,7777448	37,695784
1,9E-03	7,308E+16	2,264E+16	38,8303764	37,658567
2,0E-03	7,703E+16	2,181E+16	38,8830079	37,621351
2,2E-03	8,12E+16	2,102E+16	38,9356395	37,584135
2,3E-03	8,558E+16	2,025E+16	38,9882711	37,546919
2,5E-03	9,021E+16	1,951E+16	39,0409027	37,509703
2,6E-03	9,508E+16	1,88E+16	39,0935343	37,472487
2,7E-03	1,002E+17	1,811E+16	39,1461658	37,435271

GaSb	$N_A = N_D = 10^{19} \text{ cm}^{-3}$			
xn/xp (cm)	npo (cm-3)	1100423,2	pno (cm-3)	1100423,2
	Vbi (V)	0,7728019		
	Ln (cm)	0,0027386	Lp (cm)	0,003873
	Skala Linier		Skala Logaritma	
	n(x)	p(x)	ln n(x)	ln p(x)
-0,003874	8,9414E+17	1E+19	41,334636	43,749306
-0,00367	9,6323E+17	9,489E+18	41,409069	43,696674
-0,003466	1,0377E+18	9,003E+18	41,483501	43,644042
-0,003262	1,1178E+18	8,541E+18	41,557933	43,591411
-0,003058	1,2042E+18	8,103E+18	41,632365	43,538779
-0,002855	1,2973E+18	7,688E+18	41,706798	43,486148
-0,002651	1,3975E+18	7,294E+18	41,78123	43,433516
-0,002447	1,5055E+18	6,92E+18	41,855662	43,380884
-0,002243	1,6218E+18	6,565E+18	41,930095	43,328253
-0,002039	1,7472E+18	6,228E+18	42,004527	43,275621
-0,001835	1,8822E+18	5,909E+18	42,078959	43,22299
-0,001631	2,0276E+18	5,606E+18	42,153392	43,170358
-0,001428	2,1843E+18	5,319E+18	42,227824	43,117727
-0,001224	2,3531E+18	5,046E+18	42,302256	43,065095
-0,00102	2,5349E+18	4,787E+18	42,376688	43,012463
-0,000816	2,7308E+18	4,542E+18	42,451121	42,959832
-0,000612	2,9418E+18	4,309E+18	42,525553	42,9072
-0,000408	3,1691E+18	4,088E+18	42,599985	42,854569
-0,000205	3,414E+18	3,878E+18	42,674418	42,801937
-7,310E-07	3,6778E+18	3,679E+18	42,74885	42,749306
-5,85E-07	3,678E+18	3,679E+18	42,748903	42,749268

GaSb	$N_A = N_D = 10^{19} \text{ cm}^{-3}$			
xn/xp (cm)	npo (cm-3)	1100423,2	pno (cm-3)	1100423,2
	Vbi (V)	0,7728019		
	Ln (cm)	0,0027386	Lp (cm)	0,003873
	Skala Linier		Skala Logaritma	
	n(x)	p(x)	ln n(x)	ln p(x)
-4,386E-07	3,6782E+18	3,679E+18	42,748957	42,74923
-2,92E-07	3,6784E+18	3,679E+18	42,74901	42,749192
-1,462E-07	3,6786E+18	3,679E+18	42,749063	42,749155
0	3,6788E+18	3,679E+18	42,749117	42,749117
1,462E-07	3,679E+18	3,679E+18	42,74917	42,749079
2,924E-07	3,6792E+18	3,679E+18	42,749224	42,749041
4,386E-07	3,6794E+18	3,678E+18	42,749277	42,749004
5,848E-07	3,6796E+18	3,678E+18	42,74933	42,748966
7,310E-07	3,6798E+18	3,678E+18	42,749384	42,748928
0,0001449	3,8786E+18	3,544E+18	42,802015	42,711712
0,000289	4,0882E+18	3,414E+18	42,854647	42,674496
0,0004331	4,3092E+18	3,29E+18	42,907278	42,63728
0,0005773	4,542E+18	3,169E+18	42,95991	42,600063
0,0007214	4,7875E+18	3,054E+18	43,012542	42,562847
0,0008656	5,0462E+18	2,942E+18	43,065173	42,525631
0,0010097	5,3189E+18	2,835E+18	43,117805	42,488415
0,0011538	5,6064E+18	2,731E+18	43,170436	42,451199
0,001298	5,9094E+18	2,631E+18	43,223068	42,413983
0,0014421	6,2287E+18	2,535E+18	43,275699	42,376767
0,0015862	6,5653E+18	2,442E+18	43,328331	42,33955
0,0017304	6,9201E+18	2,353E+18	43,380963	42,302334
0,0018745	7,2941E+18	2,267E+18	43,433594	42,265118
0,0020187	7,6883E+18	2,184E+18	43,486226	42,227902
0,0021628	8,1037E+18	2,105E+18	43,538857	42,190686
0,0023069	8,5417E+18	2,028E+18	43,591489	42,15347
0,0024511	9,0033E+18	1,954E+18	43,644121	42,116254
0,0025952	9,4898E+18	1,882E+18	43,696752	42,079037
0,0027393	1,0003E+19	1,814E+18	43,749384	42,041821

InAs	$N_A = N_D = 10^{15} \text{ cm}^{-3}$			
xn/xp (cm)	npo (cm-3)	8,826E+15	pno (cm-3)	8,8256E+15
	Vbi (V)	-0,056401		
	Ln (cm)	0,0029292	Lp (cm)	0,00034641
	Skala Linier		Skala Logaritma	
	n(x)	p(x)	ln n(x)	ln p(x)
-0,000368	9,15E+15	9,889E+15	36,752541	3,68E+01
-0,00035	9,152E+15	9,835E+15	36,752763	3,68E+01
-0,000331	9,154E+15	9,783E+15	36,752986	3,68E+01
-0,000313	9,156E+15	9,734E+15	36,75321	3,68E+01
-0,000295	9,158E+15	9,687E+15	36,753435	3,68E+01
-0,000277	9,16E+15	9,643E+15	36,753662	3,68E+01
-0,000258	9,162E+15	9,601E+15	36,75389	3,68E+01
-0,00024	9,165E+15	9,561E+15	36,754119	3,68E+01
-0,000222	9,167E+15	9,524E+15	36,75435	3,68E+01
-0,000204	9,169E+15	9,488E+15	36,754583	3,68E+01
-0,000185	9,171E+15	9,454E+15	36,754816	3,68E+01
-0,000167	9,173E+15	9,422E+15	36,755051	3,68E+01
-0,000149	9,175E+15	9,391E+15	36,755288	3,68E+01
-0,000131	9,177E+15	9,362E+15	36,755526	3,68E+01
-0,000113	9,18E+15	9,335E+15	36,755765	3,68E+01
-9,43E-05	9,182E+15	9,309E+15	36,756006	3,68E+01
-7,6E-05	9,184E+15	9,284E+15	36,756248	3,68E+01
-5,78E-05	9,186E+15	9,26E+15	36,756492	3,68E+01
-3,96E-05	9,189E+15	9,238E+15	36,756737	3,68E+01
-2,134E-05	9,191E+15	9,217E+15	36,756983	3,68E+01
-1,71E-05	9,191E+15	9,212E+15	36,757041	3,68E+01
-1,281E-05	9,192E+15	9,207E+15	36,757099	3,68E+01
-8,54E-06	9,192E+15	9,203E+15	36,757157	3,68E+01
-4,269E-06	9,193E+15	9,198E+15	36,757216	3,68E+01
0	9,194E+15	9,194E+15	36,757274	3,68E+01
4,269E-06	9,194E+15	9,189E+15	36,757332	3,68E+01
8,538E-06	9,195E+15	9,185E+15	36,757391	3,68E+01
1,281E-05	9,195E+15	9,18E+15	36,757449	3,68E+01
1,708E-05	9,196E+15	9,176E+15	36,757508	3,68E+01
2,134E-05	9,196E+15	9,172E+15	36,757567	3,68E+01
0,0001755	9,216E+15	9,047E+15	36,759742	3,67E+01
0,0003297	9,237E+15	8,968E+15	36,76203	3,67E+01
0,0004838	9,26E+15	8,917E+15	36,764435	3,67E+01
0,000638	9,283E+15	8,884E+15	36,766965	3,67E+01
0,0007922	9,308E+15	8,863E+15	36,769624	3,67E+01
0,0009463	9,334E+15	8,85E+15	36,772419	3,67E+01
0,0011005	9,361E+15	8,841E+15	36,775357	3,67E+01
0,0012547	9,39E+15	8,835E+15	36,778445	3,67E+01
0,0014088	9,421E+15	8,832E+15	36,781689	3,67E+01

InAs	$N_A = N_D = 10^{15} \text{ cm}^{-3}$			
xn/xp (cm)	npo (cm-3)	8,826E+15	pno (cm-3)	8,8256E+15
	Vbi (V)	-0,056401		
	Ln (cm)	0,0029292	Lp (cm)	0,00034641
	Skala Linier		Skala Logaritma	
	n(x)	p(x)	ln n(x)	ln p(x)
0,001563	9,453E+15	8,83E+15	36,785096	3,67E+01
0,0017172	9,487E+15	8,828E+15	36,788676	3,67E+01
0,0018713	9,523E+15	8,827E+15	36,792435	3,67E+01
0,0020255	9,56E+15	8,827E+15	36,796382	3,67E+01
0,0021797	9,6E+15	8,826E+15	36,800526	3,67E+01
0,0023338	9,642E+15	8,826E+15	36,804875	3,67E+01
0,002488	9,686E+15	8,826E+15	36,809439	3,67E+01
0,0026422	9,732E+15	8,826E+15	36,814226	3,67E+01
0,0027963	9,781E+15	8,826E+15	36,819248	3,67E+01
0,0029505	9,833E+15	8,826E+15	36,824515	3,67E+01

InAs	$N_A = N_D = 10^{17} \text{ cm}^{-3}$			
xn/xp (cm)	npo (cm-3)	8,826E+13	pno (cm-3)	8,826E+13
	Vbi (V)	0,1821464		
	Ln (cm)	0,0029292	Lp (cm)	0,0003464
	Skala Linier		Skala Logaritma	
	n(x)	p(x)	ln n(x)	ln p(x)
-3,5E-04	3,273E+16	1,012E+17	38,0270749	39,155891
-3,3E-04	3,293E+16	9,602E+16	38,0332825	39,103306
-3,1E-04	3,314E+16	9,11E+16	38,0394902	39,050724
-3,0E-04	3,335E+16	8,643E+16	38,045698	38,998145
-2,8E-04	3,355E+16	8,201E+16	38,0519059	38,945569
-2,6E-04	3,376E+16	7,781E+16	38,0581139	38,892995
-2,4E-04	3,397E+16	7,382E+16	38,0643221	38,840425
-2,2E-04	3,418E+16	7,004E+16	38,0705303	38,787858
-2,0E-04	3,44E+16	6,645E+16	38,0767386	38,735294
-1,9E-04	3,461E+16	6,305E+16	38,082947	38,682735
-1,7E-04	3,483E+16	5,982E+16	38,0891555	38,630179
-1,5E-04	3,504E+16	5,676E+16	38,0953642	38,577627
-1,3E-04	3,526E+16	5,386E+16	38,1015729	38,525079
-1,1E-04	3,548E+16	5,11E+16	38,1077817	38,472536
-9,5E-05	3,57E+16	4,848E+16	38,1139906	38,419998
-7,7E-05	3,592E+16	4,6E+16	38,1201996	38,367465
-5,9E-05	3,615E+16	4,365E+16	38,1264087	38,314937
-4,0E-05	3,637E+16	4,141E+16	38,1326179	38,262415
-2,2E-05	3,66E+16	3,93E+16	38,1388272	38,209898
-3,835E-06	3,683E+16	3,729E+16	38,1450365	38,157388
-3,1E-06	3,684E+16	3,72E+16	38,1452978	38,155179

InAs	$N_A = N_D = 10^{17} \text{ cm}^{-3}$			
xn/xp (cm)	npo (cm-3)	8,826E+13	pno (cm-3)	8,826E+13
	Vbi (V)	0,1821464		
	Ln (cm)	0,0029292	Lp (cm)	0,0003464
	Skala Linier		Skala Logaritma	
	n(x)	p(x)	ln n(x)	ln p(x)
-2,301E-06	3,685E+16	3,712E+16	38,145559	38,15297
-1,5E-06	3,686E+16	3,704E+16	38,1458203	38,150761
-7,671E-07	3,687E+16	3,696E+16	38,1460815	38,148552
0,0E+00	3,688E+16	3,688E+16	38,1463428	38,146343
7,671E-07	3,689E+16	3,679E+16	38,146604	38,144134
1,5E-06	3,69E+16	3,671E+16	38,1468652	38,141925
2,301E-06	3,691E+16	3,663E+16	38,1471265	38,139716
3,1E-06	3,691E+16	3,655E+16	38,1473877	38,137507
3,835E-06	3,692E+16	3,647E+16	38,147649	38,135298
1,6E-04	3,892E+16	2,34E+16	38,200158	37,691613
3,1E-04	4,101E+16	1,503E+16	38,2526733	37,248684
4,7E-04	4,322E+16	9,662E+15	38,3051945	36,806931
6,2E-04	4,556E+16	6,223E+15	38,3577214	36,366998
7,7E-04	4,801E+16	4,019E+15	38,4102537	35,929876
9,3E-04	5,06E+16	2,607E+15	38,462791	35,497069
1,1E-03	5,333E+16	1,702E+15	38,5153332	35,070826
1,2E-03	5,621E+16	1,123E+15	38,5678799	34,654432
1,4E-03	5,924E+16	7,511E+14	38,620431	34,252517
1,5E-03	6,244E+16	5,13E+14	38,6729862	33,871267
1,7E-03	6,581E+16	3,604E+14	38,7255453	33,518296
1,9E-03	6,936E+16	2,627E+14	38,7781081	33,201879
2,0E-03	7,311E+16	2E+14	38,8306744	32,929406
2,2E-03	7,705E+16	1,599E+14	38,8832441	32,705383
2,3E-03	8,121E+16	1,341E+14	38,935817	32,529952
2,5E-03	8,559E+16	1,177E+14	38,9883928	32,398842
2,6E-03	9,021E+16	1,071E+14	39,0409715	32,304782
2,8E-03	9,509E+16	1,003E+14	39,093553	32,239497
2,9E-03	1,002E+17	9,599E+13	39,146137	32,195305

InAs	$N_A = N_D = 10^{19} \text{ cm}^{-3}$			
xn/xp (cm)	npo (cm-3)	8,826E+11	pno (cm-3)	8,826E+11
	Vbi (V)	0,4206942		
	Ln (cm)	0,0029292	Lp (cm)	0,0003464
	Skala Linier		Skala Logaritma	
	n(x)	p(x)	ln n(x)	ln p(x)
-0,000347	3,2678E+18	1,002E+19	42,630656	43,750799
-0,000329	3,2882E+18	9,503E+18	42,63688	43,698168
-0,000311	3,3088E+18	9,016E+18	42,643104	43,645536
-0,000292	3,3294E+18	8,554E+18	42,649329	43,592905
-0,000274	3,3502E+18	8,115E+18	42,655553	43,540273
-0,000256	3,3711E+18	7,699E+18	42,661777	43,487642
-0,000238	3,3922E+18	7,304E+18	42,668002	43,43501
-0,000219	3,4134E+18	6,93E+18	42,674226	43,382378
-0,000201	3,4347E+18	6,575E+18	42,68045	43,329747
-0,000183	3,4561E+18	6,238E+18	42,686675	43,277115
-0,000165	3,4777E+18	5,918E+18	42,692899	43,224484
-0,000146	3,4994E+18	5,614E+18	42,699123	43,171852
-0,000128	3,5212E+18	5,326E+18	42,705348	43,119221
-0,00011	3,5432E+18	5,053E+18	42,711572	43,066589
-9,17E-05	3,5654E+18	4,794E+18	42,717796	43,013957
-7,35E-05	3,5876E+18	4,548E+18	42,724021	42,961326
-5,53E-05	3,61E+18	4,315E+18	42,730245	42,908694
-3,7E-05	3,6326E+18	4,094E+18	42,736469	42,856063
-1,88E-05	3,6552E+18	3,884E+18	42,742694	42,803431
-5,829E-07	3,6781E+18	3,685E+18	42,748918	42,7508
-4,66E-07	3,6782E+18	3,684E+18	42,748958	42,750463
-3,497E-07	3,6784E+18	3,683E+18	42,748998	42,750127
-2,33E-07	3,6785E+18	3,681E+18	42,749037	42,74979
-1,166E-07	3,6786E+18	3,68E+18	42,749077	42,749454
0	3,6788E+18	3,679E+18	42,749117	42,749117
1,166E-07	3,6789E+18	3,678E+18	42,749157	42,74878
2,331E-07	3,6791E+18	3,676E+18	42,749197	42,748444
3,497E-07	3,6792E+18	3,675E+18	42,749236	42,748107
4,663E-07	3,6794E+18	3,674E+18	42,749276	42,747771
5,829E-07	3,6795E+18	3,673E+18	42,749316	42,747434
0,0001547	3,8784E+18	2,353E+18	42,801948	42,302394
0,0003089	4,088E+18	1,508E+18	42,854579	41,857354
0,0004631	4,3089E+18	9,664E+17	42,907211	41,412314
0,0006172	4,5417E+18	6,192E+17	42,959842	40,967274
0,0007714	4,7872E+18	3,968E+17	43,012474	40,522234
0,0009256	5,0459E+18	2,543E+17	43,065105	40,077195
0,0010797	5,3186E+18	1,629E+17	43,117737	39,632157
0,0012339	5,606E+18	1,044E+17	43,170369	39,18712
0,0013881	5,909E+18	6,691E+16	43,223	38,742084

InAs	$N_A = N_D = 10^{19} \text{ cm}^{-3}$			
xn/xp (cm)	npo (cm-3)	8,826E+11	pno (cm-3)	8,826E+11
	Vbi (V)	0,4206942		
	Ln (cm)	0,0029292	Lp (cm)	0,0003464
	Skala Linier		Skala Logaritma	
	n(x)	p(x)	ln n(x)	ln p(x)
0,0015422	6,2283E+18	4,287E+16	43,275632	38,297051
0,0016964	6,5649E+18	2,747E+16	43,328263	37,852022
0,0018506	6,9196E+18	1,761E+16	43,380895	37,407
0,0020047	7,2936E+18	1,128E+16	43,433526	36,961987
0,0021589	7,6877E+18	7,23E+15	43,486158	36,516991
0,0023131	8,1032E+18	4,633E+15	43,53879	36,072019
0,0024672	8,5411E+18	2,969E+15	43,591421	35,627085
0,0026214	9,0027E+18	1,903E+15	43,644053	35,182212
0,0027756	9,4892E+18	1,22E+15	43,696684	34,737431
0,0029297	1,0002E+19	7,819E+14	43,749316	34,292796

E. Perhitungan Tebal Lapisan Sambungan n-p

Material	L_n (cm)	L_p (cm)	$N_A = N_D = 10^{15} \text{ cm}^{-3}$	
			W (cm)	t (cm)
AlAs	0,00072111	0,000509902	0,000191426	0,001422438
InGaP	$7,07107 \cdot 10^{-5}$	$3,5846910^{-6}$	0,000189324	0,00026362
GaSb	0,002738613	0,003872983	$9,0433 \cdot 10^{-5}$	0,006702029
InAs	0,002929164	0,00034641	$4,26838 \cdot 10^{-5}$	0,003318258

Material	L_n (cm)	L_p (cm)	$N_A = N_D = 10^{17} \text{ cm}^{-3}$	
			W (cm)	t (cm)
AlAs	0,00072111	0,000509902	$2,04825 \cdot 10^{-5}$	0,001251495
InGaP	$7,07107 \cdot 10^{-5}$	$3,5846910^{-6}$	$2,05114 \cdot 10^{-5}$	$9,48067 \cdot 10^{-5}$
GaSb	0,002738613	0,003872983	$1,21554 \cdot 10^{-5}$	0,006623752
InAs	0,002929164	0,00034641	$7,67058 \cdot 10^{-6}$	0,003283244

Material	L_n (cm)	L_p (cm)	$N_A = N_D = 10^{19} \text{ cm}^{-3}$	
			W (cm)	t (cm)
AlAs	0,00072111	0,000509902	$2,174 \cdot 10^{-6}$	0,001233186
InGaP	$7,07107 \cdot 10^{-5}$	$3,5846910^{-6}$	$2,19771 \cdot 10^{-6}$	$7,64931 \cdot 10^{-5}$
GaSb	0,002738613	0,003872983	$1,46194 \cdot 10^{-6}$	0,006613058
InAs	0,002929164	0,00034641	$1,16574 \cdot 10^{-6}$	0,00327674

Material	$N_A = N_D = 10^{15} \text{ cm}^{-3}$		
	E (V/cm)	V_{OC} (V)	t (cm)
AlAs	17199,04	0,823	$4,78515 \cdot 10^{-5}$
InGaP	14503,29915	0,684	$4,71617 \cdot 10^{-5}$
GaSb	7567,04123	0,1479	$1,95453 \cdot 10^{-5}$
InAs	3075,73408	0,028	$9,10352 \cdot 10^{-6}$

Material	$N_A = N_D = 10^{17} \text{ cm}^{-3}$		
	E (V/cm)	V_{OC} (V)	t (cm)
AlAs	171990,4295	0,94	$5,46542 \cdot 10^{-6}$
InGaP	145032,9915	0,792	$5,46083 \cdot 10^{-6}$
GaSb	75670,41231	0,2812	$3,71612 \cdot 10^{-6}$
InAs	30757,34077	0,091	$2,95864 \cdot 10^{-6}$

Material	$N_A = N_D = 10^{19} \text{ cm}^{-3}$		
	E (V/cm)	V_{OC} (V)	t (cm)
AlAs	$1,72 \cdot 10^6$	1,0414	$6,06 \cdot 10^{-7}$
InGaP	$1,45 \cdot 10^6$	0,911	$6,28 \cdot 10^{-7}$
GaSb	756704,1231	0,4	$5,29 \cdot 10^{-7}$
InAs	307573,4077	0,227	$7,38 \cdot 10^{-7}$

Material	$N_A = N_D = 10^{15} \text{ cm}^{-3}$		$N_A = N_D = 10^{17} \text{ cm}^{-3}$		$N_A = N_D = 10^{19} \text{ cm}^{-3}$	
	t (μm)	t (μm)	t (μm)	t (μm)	t (μm)	t (μm)
AlAs	14,224	0,479	12,515	0,055	12,332	0,006
InGaP	2,636	0,472	0,948	0,055	0,765	0,006
GaSb	67,020	0,195	66,238	0,037	66,131	0,005
InAs	33,183	0,091	32,832	0,030	32,767	0,007

Sambungan	$N_A = N_D = 10^{15} \text{ cm}^{-3}$		$N_A = N_D = 10^{17} \text{ cm}^{-3}$		$N_A = N_D = 10^{19} \text{ cm}^{-3}$	
	t (μm)	t (μm)	t (μm)	t (μm)	t (μm)	t (μm)
AlAs-InGaP	16,861	0,950	13,463	0,109	13,097	0,012
AlAs-InGaP-GaSb	83,881	1,146	79,701	0,146	79,227	0,018
AlAs-InGaP-GaSb-InAs	117,063	1,237	112,533	0,176	111,995	0,025

F. Rapat Arus Keluaran

Material	Tipe	L (cm)	$N_A = N_D = 10^{15} \text{ cm}^{-3}$		
			n_{po}/p_{no} (cm-3)	τ_n/τ_p (s)	I_S (A)
AlAs	n	7,21E-04	2,4775E-13	1,00E-07	4,88E-28
	p	5,10E-04	2,4775E-13	1,00E-07	
InGaP	n	7,07E-05	9,5192E-09	5,00E-09	2,26E-23
	p	3,58E-06	9,5192E-09	5,00E-09	
GaSb	n	2,74E-03	1,1004E+10	1,00E-07	5,96E-05
	p	3,87E-03	1,1004E+10	6,00E-07	
InAs	n	2,93E-03	8,8256E+15	1,00E-08	4,63E+02
	p	3,46E-04	8,8256E+15	1,00E-08	

Material	Tipe	L (cm)	$N_A = N_D = 10^{17} \text{ cm}^{-3}$		
			n_{po}/p_{no} (cm-3)	τ_n/τ_p (s)	I_S (A)
AlAs	n	7,21E-04	2,4775E-15	1,00E-07	4,88E-30
	p	5,10E-04	2,4775E-15	1,00E-07	
InGaP	n	7,07E-05	9,5192E-11	5,00E-09	2,26E-25
	p	3,58E-06	9,5192E-11	5,00E-09	
GaSb	n	2,74E-03	110042323	1,00E-07	5,96E-07
	p	3,87E-03	110042323	6,00E-07	
InAs	n	2,93E-03	8,8256E+13	1,00E-08	4,63E+00
	p	3,46E-04	8,8256E+13	1,00E-08	

Material	Tipe	L (cm)	$N_A = N_D = 10^{19} \text{ cm}^{-3}$		
			n_{po}/p_{no} (cm-3)	τ_n/τ_p (s)	I_S (A)
AlAs	n	7,21E-04	2,477E-17	1,00E-07	4,88E-32
	p	5,10E-04	2,477E-17	1,00E-07	
InGaP	n	7,07E-05	9,519E-13	5,00E-09	2,26E-27
	p	3,58E-06	9,519E-13	5,00E-09	
GaSb	n	2,74E-03	1100423,2	1,00E-07	5,96E-09
	p	3,87E-03	1100423,2	6,00E-07	
InAs	n	2,93E-03	8,826E+11	1,00E-08	4,63E-02
	p	3,46E-04	8,826E+11	1,00E-08	

BIOGRAFI



Penulis bernama Ayu Kusuma Wardhani. Penulis dilahirkan di Surabaya, 3 Januari 1991. Penulis mengambil program Sarjana di Jurusan Fisika, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) pada tahun 2009. Setelah lulus pada tahun 2013, penulis menempuh pendidikan Magister di Jurusan Teknik Fisika, ITS melalui program beasiswa *Fresh Graduate* yang diselenggarakan oleh Direktorat Jendral Perguruan Tinggi (Dikti) pada tahun 2014. Selama menempuh pendidikan di ITS, penulis aktif menjadi asisten pada mata kuliah Sistem Fotonik pada awal tahun 2016. Selain itu, penulis juga tergabung dalam *Student Chapter of International Society for Optics and Photonics* (SPIE) 2015-2016 dan aktif dalam kegiatannya. Penulis juga menjadi asisten mata kuliah Fisika Dasar selama 2 semester. Penulis juga pernah menjadi asisten laboratorium dalam bidang optik saat menempuh pendidikan Sarjana. Penulis tertarik dalam dalam bidang optoelektronika sejak menempuh pendidikan Sarjana. Pada program Sarjana, penulis menghasilkan karya “Fabrikasi Antena Mikrostrip Dipole Bersudut Untuk Frekuensi Wi-fi 2,4 GHz”. Sedangkan pada program Magister ini, penulis menghasilkan karya “Analisis Sel Surya *Multijunction* dengan Bahan Semikonduktor Gabungan III-V”.

ⁱ <http://www.semiconductors.co.uk/propiiiiv5653.htm>

ⁱⁱ <http://www.ioffe.ru/SVA/NSM/Semicond/GaInP/basic.html>

ⁱⁱⁱ W.G.J.H.M. van Sark, L. Korte, F. Roca, 2012, *Physics and Technology of Amorphous-Crystalline Heterostructure Silicon Solar Cells*, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg.

^{iv} M. Babar, S.Q. Ali, E.A.Al-Ammar, Modeling of Tunnel Junction of Multi-Junction Solar Cell, Recent *Proceedings of the 6th WSEAS International Conference on Renewable Energy Sources, Researches in Energy, Environment and Sustainable Development*, Porto, Portugal, July 1-3 2012.

^v S.M. Sze, 2002, *Semiconductor Devices Physics and Technology*, 2nd Ed., John Wiley & Sons, New York.

^{vi} J.M.O Zide, A. Kleiman-Schwarstein, N.C. Strandwitz, J.D. Zimmerman, T. Steenblock-Smith, A.C. Gossard, A. Forman, A. Ivanovskaya, G.D. Stucky, Increased efficiency in multijunction solar cells through the incorporation of semimetallic ErAs nanoparticles into the tunnel junction, *Appl. Phys. Lett.* **88**, 162103 (2006)